TUGAS AKHIR – TL141584

PENGARUH PENAMBAHAN NIKEL (Ni) TERHADAP SIFAT ELEKTRIK DAN KEKERASAN PADUAN TEMBAGA-NIKEL UNTUK APLIKASI TERMOKOPEL

Paulindra M. Pangaribuan
NRP 2712 100 137

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Hosta Ardhyananta. S.T., M.Sc.
Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T.

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016

(halaman ini sengaja dikosongkan)

FINAL PROJECT – TL141584

EFFECT OF NICKEL (Ni) ADDITION ON ELECTRICAL PROPERTIES AND HARDNESS OF COPPER-NICKEL ALLOY ON THERMOCOUPLE APPLICATION

Paulindra M. Pangaribuan
NRP 2712 100 137

ADVISOR
Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S.T., M.Sc
Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T.

Department of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016

(halaman ini sengaja dikosongkan)

Pengaruh Penambahan Nikel (Ni) Terhadap Sifat Elektrik dan Kekerasan Paduan Tembaga-Nikel (Cu-Ni) untuk Aplikasi Termokopel

TUGAS AKHIR
Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
PAULINDRA M. PANGARIBUAN
NRP 2712 100 137

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Eng. Hosta Ardhyananta. S.T., M.Sc. .....(Pembimbing 1)
2. Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T. .....(Pembimbing 2)

SURABAYA
2016

(halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat serta karunia-Nya kepada kami sehingga kami dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir dengan judul

"Pengaruh Penambahan Nikel (Ni) terhadap Sifat Elektrik dan Kekerasan Paduan Tembaga Nikel (Cu-Ni) untuk Aplikasi Termokopel".

Laporan Tugas Akhir ini disusun untuk sebagai yang menjadi salah satu syarat kelulusan mahasiswa di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Dalam pelaksanaannya, ada banyak pihak yang membantu terlaksananya kerja praktik ini. Sehingga Laporan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, kami ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah terlibat baik secara moril ataupun materil. Kami sangat berterima kasih kepada:

1. Orang tua, adik, dan relasi yang selalu setia mendoakan, mendukung, dan memberikan semangat selama ini,
2. Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S. T., M. Sc dan Bapak Alvian Toto Wibisono S.T., M.T selaku dosen pembimbing Tugas Akhir,
3. Ibu Dr. Diah Susanti, ST., MT., Ph.D selaku dosen wali selama kuliah,
4. Bapak Dr. Agung Purniawan, ST, M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
5. Dosen Tim Penguji Seminar Tugas Akhir beserta seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi,

6. Teman-teman Jurusan Teknik Material dan Metalurgi angkatan 2012 “MT14” atas kebersamaan selama kuliah,
7. Teman-teman Naposobulung HKBP Manyar untuk semangat, doa, dan kebersamaan dalam pelayanan naposobulung di Gereja HKBP Manyar Surabaya,
8. Para perantau dan pemilik kosan KP 12 yang setiap hari selalu memberikan warna-warni dalam kehidupan ala anak kosan sehari-hari,
9. Only Fresly Simatupang atas semua suka dan duka yang kita jalani bersama. *Nang pe mata dang marsipanotnotan, alai tondinta tong do marsigonggoman*.
10. BSO MB “Train Hard or Go Home” periode 2013-2014 dan periode 2014-2015 yang telah mengajari penulis nikmatnya kehidupan berorganisasi.
11. Mahasiswa Bona Pasogit angkatan 2012, sebagai keluarga kecil yang tetap mengingatkan akan kehangatan kampung halaman di perantauan.
12. Lapo Simatupang atas asupan gizi khas Batak yang selalu mengingatkan kepada kampung halaman,
13. Pihak-pihak lain yang belum kami tuliskan satu-per-satu yang telah membantu terlaksananya kerja praktik ini dengan baik. Terima kasih banyak atas bantuan dan dukungannya.

Kami berharap Laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang membaca. Kami menyadari bahwa laporan yang telah kami susun ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, kami mohon maaf jika ada kata-kata yang tidak berkenan ataupun salah informasi. Kami sangat menerima kritik dan saran yang membangun dari para pembaca demi penulisan laporan yang lebih baik.

Surabaya, 2016

Paulindra M. Pangaribuan

PENGARUH PENAMBAHAN NIKEL (NI) TERHADAP SIFAT ELEKTRIK DAN KEKERASAN PADUAN Cu-Ni UNTUK APLIKASI TERMOKOPEL

Nama : Paulindra M. Pangaribuan
NRP : 2712100137
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing : Dr. Eng. Hosta Ardhyananta. S.T., M.Sc.
Alvian Toto Wibisono S.T., M.T.

Abstrak

Tembaga adalah logam transisi dan merupakan salah satu logam komersial yang digunakan di industri. Tembaga memiliki sifat elektriktrik tertinggi nomor dua setelah perak. Perpaduan tembaga-nikel sering digunakan sebagai instrumen kelistrikan. Penambahan nikel pada tembaga bertujuan untuk meningkatkan kekuatan, daya tahan, sifat termoelektriknya. Pemaduan dilakukan dengan proses peleburan. Raw material dileburkan dengan menggunakan Burner Furnace pada temperatur 1800°C selamat 45-60 menit. Pada penelitian ini dilakukan variasi kadar Nikel pada kadar 20;25;30;35;40 %wt untuk mengetahui pengaruhnya terhadap sifat elektrik dan kekerasan paduan. Pengujian yang dilakukan adalah uji komposisi kimia menggunakan OES, Uji fasa menggunakan XRD, Uji Struktur Mikro, Uji Kekerasan dengan menggunakan metode Brinell, dan Uji Konduktivitas Listrik menggunakan metode Four Point Probe. Nilai konduktifitas listrik paduan naik seiring bertambahnya nikel sampai kadar 35%wt Ni, dan turun pada kadar 40%wt Ni. Hal ini dipengaruhi oleh ukuran butir pada paduan. Kekerasan pada paduan Cu-Ni juga meningkat seiring bertambahnya kadar nikel, hal ini karena sifat Cu-Ni yang larut sepenuhnya menjadi solid solution dan meningkatkan sifat mekaniknya.

Kata kunci: Paduan Cu-Ni, Sifat elektrik, Kekerasan

(halaman ini sengaja dikosongkan)

EFFECT OF NICKEL (Ni) ADDITION ON ELETRICAL PROPERTIES AND HARDNESS OF Cu-Ni ALLOY ON THERMOCOUPLE APPLICATION

Name	: Paulindra M. Pangaribuan
NRP	: 2712100137
Department	: Teknik Material dan Metalurgi
Advisor	: Dr. Eng. Hosta Ardhyananta. S.T., M.Sc. Alvian Toto Wibisono S.T., M.T.

Abstract

Copper is one of transition metal and is one of the most commercial metal used in industry. Copper has the second best electrical properties after silver. The alloys of copper-nickel often used as electrical instrument. The purpose of adding of nickel on copper are to increase the strength, endurance, and the thermoelectrical properties. The alloying was done by melting process. The raw materials were melted by Burner Furnace at 1800 ^{o}C for 45-60 minutes. There were some variations in nickel content for the alloy, i.e 20;25;30;35;40 %wt of nickel to find out it's effect on the electrical properties and hardness. The characterization was done by using OES for chemical composition, XRD for phase characterization, microstructure test, Four Point Probe method for electrical conductivity, and Brinell method for hardness test. The electrical conductivity tends to increase over the addition of nickel up to 35%wt of nickel and decrease at 40%wt of nickel. This was due to the grain size and the alloying element. The hardness tends to increase over the addition of nickel because the properties of copper and nickel which dissolve completely forming solid solution and increase the mechanical properties.

Keyword : Cu-Ni alloy, Electrical properties, Hardness

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i

LEMBAR PENGESAHAN v

ABSTRAK vii

KATA PENGANTAR xi

DAFTAR ISI xiii

DAFTAR GAMBAR xvii

DAFTAR TABEL xix

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 2

1.3 Batasan Masalah 2

1.4 Tujuan Penelitian 3

1.5 Manfaat Penelitian 3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Termokopel 5

2.2 Thermocouple type-T 10

2.3. Seebeck Coefficient 11

2.4 Tembaga 12

2.4.1 Sifat Tembaga 13

2.4.2 Klasifikasi Tembaga dan Paduannya 15

2.4.3 Unsur Pemadu Utama Tembaga 17
2.4.4 Aplikasi Tembaga 18
2.5 Nikel 20
2.5.1 Sejarah Nikel 20
2.5.2 Sifat-sifat Nikel 21
2.5.3 Klasifikasi Nikel dan Paduannya 22
2.5.4 Aplikasi Nikel dan Paduannya 23
2.6 Paduan Tembaga-Nikel 24
2.6.1 Constantan 27

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian 31
3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian 32
3.2.1 Bahan Penelitian 32
3.2.2 Peralatan Penelitian 33
3.3 Prosedur Percobaan 39
3.3.1 Persiapan Bahan 39
3.3.2 Proses Pengujian 40
3.3.2.1 Pengujian Komposisi Kimia 40
3.3.2.2 Pengujian Fasa 41
3.3.2.3 Pengujian Metalografi 42
3.3.2.5 Pengujian Konduktifitas Listrik 43
3.3.2.5 Pengujian Kekerasan 45

3.4 Rancangan Penelitian 46

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengamatan Makro Paduan Cu-Ni..... 47

4.2 Komposisi Kimia Paduan Cu-Ni 48

4.3 Pengamatan Pola XRD Paduan Cu-Ni..... 50

4.4 Pengamatan Struktur Mikro Paduan Cu-Ni 52

4.5 Pengujian Konduktivitas Listrik Paduan Cu-Ni..... 58

4.6 Pengujian Kekerasan 61

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan..... 65

5.2 Saran..... 65

DAFTAR PUSTAKA xxi

LAMPIRAN

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Termokopel Komersial 5

Gambar 2.2 (a) Termokopel Sederhana dengan Dua Persimpangan (b) Termokopel dengan Tiga Persimpangan 6

Gambar 2.3 Termokopel Tipe-T (a) Kabel Termokopel (b) Skema Kabel Termokopel Tipe-T 10

Gambar 2.4 Struktur Kristal Tembaga 13

Gambar 2.5 Diagram Fasa Tembaga-Nikel 25

Gambar 2.6 Struktur Mikro paduan Cu-Ni (a) Tembaga cor dengan ukuran butir yang berbeda karena laju pendinginan cepat (b) Tembaga tempa dengan butiran polihedral yang seragam dan anil kembar (c) 70Cu-30Ni yang terdiri dari rekristalisasi butir-α dengan *twin band* (d) 90Cu-10Ni dengan perlakuan anil 27

Gambar 2.7 Diagram Fasa Constantan 28

Gambar 3.1 Diagram Alir Percobaan 31

Gambar 3.2 Tembaga 32

Gambar 3.3 Nickel sheet 33

Gambar 3.4 Burner furnace 34

Gambar 3.5 Krus 34

Gambar 3.6 Mesin Uji OES 36

Gambar 3.7 Mesin Uji XRD 37

Gambar 3.8 Mikroskop Optik Olympus BX51 37

Gambar 3.9 Mesin Uji Four Point Probe 38

Gambar 3.10 Mesin Uji Kekerasan 38

Gambar 3.11 (a) Desain Spesimen Hasil Coran (b) Desain Cetakan 39
Gambar 3.12 Prinsip Pengujian OES 41
Gambar 3.13 Prinsip Kerja XRD.....42
Gambar 3.14 Alur sinar datang pada pengamatan metalografi ...43
Gambar 3.15 Setting alat pengujian four point probe.....44
Gambar 3.16 Pengujian Brinell Hardness. a) ketika spesimen diberi pembebanan b) ketika beban dilepas 45
Gambar 4.1 Hasil Coran Cu-Ni (a) 20 (b) 25 (c) 30 (d) 35 (e) 40 %wt Ni.....47
Gambar 4.2 Pola XRD Paduan Cu-Ni 51
Gambar 4.3 Struktur mikro paduan Cu-20Ni dengan perbesaran a) 100x ; b) 200x 53
Gambar 4.4 Struktur mikro paduan Cu-25Ni dengan perbesaran a) 100x ; b) 200x 54
Gambar 4.5 Struktur mikro paduan Cu-30Ni dengan perbesaran a) 100x ; b) 200x 55
Gambar 4.6 Struktur mikro paduan Cu-35Ni dengan perbesaran a) 100x ; b) 200x 56
Gambar 4.7 Struktur mikro paduan Cu-40Ni dengan perbesaran a) 100x ; b) 200x 57
Gambar 4.8 Diagram Konduktivitas Listrik dari Paduan Cu-Ni .60
Gambar 4.9 Pengaruh kadar Nikel terhadap nilai kekerasan Paduan Cu-Ni.....63

HKBP Manyar pada tahun 2014-2015. Di tahun 2016, penulis mengerjakan tugas akhir dengan judul "Pengaruh Penambahan Nikel (Ni) Terhadap Sifat Elektrik Dan Kekerasan Paduan Tembaga-Nikel (Cu-Ni) Untuk Aplikasi Termokopel".

Paulindra M. Pangaribuan
paulindra_pangaribuan@yahoo.com
0813 7510 4894

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses pengolahan bahan logam harus memperhatikan jenis-jenis dan sifatnya terutama pada proses pembentukan dan perilaku selama penggunaannya seperti, sifat mampu las, mampu bentuk, mampu dikerjakan dengan mesin, stabilitas listrik, ketahanan terhadap korosi, perbaikan dan perawatannya sehingga hasil pengolahan akan lebih berkualitas. Perkembangan teknologi yang sangat pesat dan maju menyebabkan kebutuhan logam di berbagai bidang meningkat pesat. (Daryanto, 2010).

Salah satu logam non ferro yang banyak digunakan dalam peralatan listrik maupun permesinan adalah tembaga (Cu). Penggunaan tembaga dan paduannya sudah berlangsung sejak ribuan tahun yang lalu oleh manusia. Dapat dianggap bahwa tembaga adalah logam tertua yang diekstraksi dan diproses oleh manusia. (Collini,L., 2012) Logam ini banyak digunakan karena konduktivitas listrik dan termal yang sangat baik, ketahanan yang luar biasa terhadap korosi, mudah difabrikasi, memiliki kekuatan yang baik, tahan terhadap lelah *(fatigue)*, dan tidak bersifat magnetik. Logam tembaga dan paduannya memiliki ketahanan korosi yang tinggi sehingga banyak digunakan untuk membuat pipa, dan katup yang dialiri fluida. (ASM Metal Handbook vol.2, 1990)

Paduan tembaga-nikel merupakan paduan dengan fasa tunggal di seluruh komposisi pada diagram fasa dan banyak paduan standar yang ada pada fasa dan komposisi tertentu dari diagram fasa tersebut. Hal ini dikarenakan tembaga dan nikel larut sepenuhnya baik pada keadaan solid maupun cair. Penggunaannya biasanya ditambahi dengan unsur-unsur yang lain untuk tujuan khusus. Penambahan nikel pada tembaga bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dan daya tahannya dan juga ketahanannya terhadap korosi, erosi, dan kavitasi pada daerah berair baik yang alami maupun tidak. Ketahanan paduan ini

terhadap cacat natural membuatnya cocok diaplikasikan pada bidang kelautan dan lingkungan kimia untuk kapal, elemen penukar panas, sistem pipa bawah laut, dan lain-lain. (Nickel Institute, 1982)

Termokopel merupakan salah satu alat pengukuran paling sederhana yang pernah dibuat, karena hanya terdiri dari dua kabel yang berbeda dan digabungkan pada salah satu ujungnya. Dengan rangkaian ini, arus dihasilkan di sepanjang kabel yang nilainya akan semakin besar apabila terjadi perubahan temperatur yang semakin besar di antara dua ujung yang digabungkan dengan kedua ujung lain yang terbuka (*open-end*). Yang dibutuhkan untuk menentukan temperatur di persimpangan dari kabel adalah untuk mengukur tegangan pada ujung terbuka, membuat penyesuaian untuk mengkompensasi perbedaan antara temperatur pada *open-end* dan temperatur pada *open-end* yang digunakan dalam kalibrasi, dan mengkonversi tegangan kompensasi ini ke suhu menggunakan kalibrasi untuk jenis kawat. (Kerlin, 2012)

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh penambahan nikel (Ni) terhadap sifat elektrik paduan tembaga-nikel (Cu-Ni) untuk aplikasi termokopel?
2. Bagaimana pengaruh penambahan nikel (Ni) terhadap kekerasan paduan tembaga-nikel (Cu-Ni) untuk aplikasi termokopel?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Temperatur peleburan homogen.
2. Proses pemaduan dianggap homogen.
3. Reaksi antara cetakan dengan logam diabaikan.
4. Reaksi antara *molten metal* dengan lingkungan diabaikan.

5. Proses solidifikasi dilakukan dengan pendinginan lambat sehingga reaksi yang terjadi dianggap sesuai dengan diagram fasa Cu-Ni.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisa pengaruh penambahan nikel (Ni) terhadap sifat elektrik paduan tembaga-nikel (Cu-Ni) untuk aplikasi termokopel
2. Menganalisa pengaruh penambahan nikel (Ni) terhadap kekerasan paduan tembaga-nikel (Cu-Ni) untuk aplikasi termokopel

1.5 Manfaat Penelitian

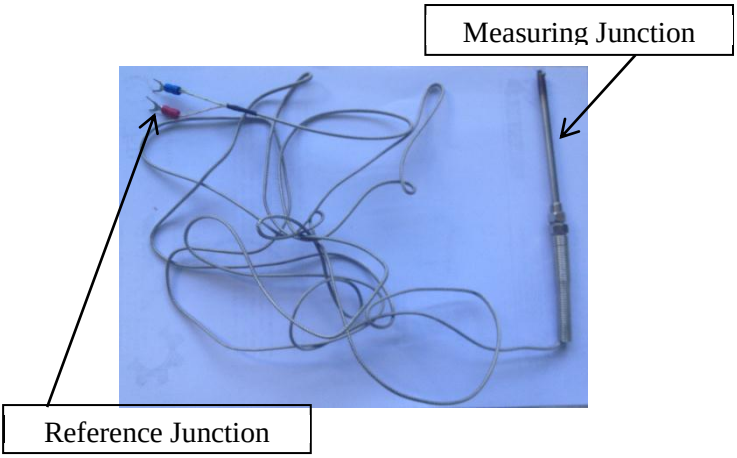
Manfaat dari penelitian ini adalah untuk dapat menghasilkan paduan melalui proses pengecoran. Paduan ini diharapkan memiliki sifat elektrik dan kekerasan yang baik agar dapat meningkatkan daya gunanya terutama dalam aplikasi termokopel. Hal ini dilakukan dengan cara merekayasa komposisi berat nikel (Ni) dalam paduan sehingga dapat diketahui paduan dengan komposisi nikel berapa yang memiliki sifat paling baik untuk dapat digunakan sebagai material termokopel.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Termokopel

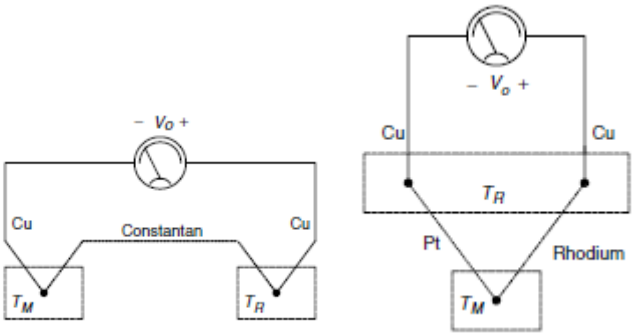
Termokopel secara tradisional digunakan untuk mengukur temperatur pada tingkat yang ekstrim. Thermocouple terdiri atas persimpangan (j*unction*), umumnya dilas, di antara dua kabel logam yang tidak sejenis (**Gambar 2.1**).



Gambar 2.1 Termokopel Komersial

Sistem termokopel pada dasarnya harus memiliki dua pasang. Akan tetapi, sistem termokopel dapat memiliki tiga atau lebih pasangan. Pada sistem dua pasangan, seperti yang terlihat pada **Gambar 2.2**, terdapat gaya elektromotif (*electromotive force*/EMF) yang permanen pada rangkaian, yang menyebabkan arus mengalir jika kedua pasang berada pada temperatur yang berbeda. Secara sederhana, pada sistem dua pasang, satu pasang persimpangan dipertahankan sebagai temperatur acuan, umumnya pada temperatur 0°C, dengan melelehkan es dalam air. Seringkali sistem termokopel (*junction*/persimpangan yang digunakan sebagai pengukur dan sebagai acuan), terdiri dari dua jenis logam

yang harus dihubungkan ke logam ketiga, seperti tembaga, untuk dihubungkan ke milivoltmeter. Penggabungan dari kedua logam termokopel ke tembaga menghasilkan persimpangan ketiga. Penambahan persimpangan ketiga pada sistem tidak akan mempengaruhi performa dari termokopel pada umumnya, asalkan kedua persimpangan dengan logam ketiga berada pada temperatur acuan yang sama. (Beckwith dan Buck, 1961)



(a) (b)

Gambar 2.2 (a) Termokopel Sederhana dengan Dua Persimpangan (b) Termokopel dengan Tiga Persimpangan (Northrop, 2005)

Keterangan:

T_M : Temperatur Pengukuran/*Measuring*

T_R : Temperatur Acuan/*Reference* (0^oC)

Vo : Voltmeter

Beberapa material yang umum yang digunakan sebagai termokopel seperti yang terlihat pada **Tabel 2.1** memiliki range temperatur efektif yang berbeda-beda, di mana sensitifitas termoelektrik logam-logam tersebut dibandingkan dengan platinum (Pt) pada temperatur mendekati 0^oC seperti yang terlihat pada **Tabel 2.2**. Gaya elektromotif yang net pada sebuah sistem termokopel bukanlah sebuah fungsi linear dari perbedaan temperatur yang ada di antara simpang ukur dan simpang acuan.

Secara umum, gaya elektromotif yang net dapat diekspresikan melalui **Persamaan 2.1** berikut:

$$E_0 = A(\Delta T) + [B(\Delta T)^2 / 2] + C(\Delta T)^3 / 3] \qquad (2.1)$$

di mana ΔT adalah perbedaan temperatur di atas temperatur simpang acuan, yang biasanya dibuat 0^oC.

Tabel 2.1 Sifat Beberapa Termokopel yang Umum (Northrop, 2005)

Material	ST *vs* Pt	Material	ST *vs* Pt
Bismuth	−72	Silver	6.5
Constantan	−35	Copper	6.5
Nickel	−15	Gold	6.5
Potassium	−9	Tungsten	7.5
Sodium	−2	Cadmium	7.5
Platinum	0	Iron	18.5
Mercury	0.6	Nichrome	25
Carbon	3	Antimony	47
Aluminum	3.5	Germanium	300
Lead	4	Silicon	440
Tantalum	4.5	Tellurium	500
Rhodium	6	Selenium	900

Sensitifitas termoelektrik pada sebuah pasang termokopel dijelaskan dengan $S_T = dE_o/dT = A + B(\Delta T) + C(\Delta T)^2$ dan biasanya diekspresikan dengan satuan $\mu V/^oC$. Sensitifitas dari termokopel dari pasangan logam apapun dapat ditemukan dengan mengurangi nilai S_T untuk platinum pada tabel di atas. Misalnya, S_T untuk tembaga dan konstantan (paduan Cu-Ni) adalah [6,5-(-35)] = 41,5 $\mu V/^oC$. (Northrop, 2005)

Tabel 2.2 Sensitifitas termoelektrik material tertentu vs Platinum, dalam μV/°C, dengan simpang acuan 0°C (Lion, 1959)

Material	Range Temperatur Penggunaan, °C	Temperatur Maksimum untuk Periode yang Singkat	Sensitivitas dalam μV/°C pada 0°C
Copper / Constantan	-200 sampai 350	600	15 @ -200
			60 @ +350
Iron / Constantan	-200 sampai +800	1000	45 @ 0
			57 @ +750
Pt / Pt90Rh10	0 sampai 1450	1700	0 @ -138
			5 @ 0
			12 @ +1500
Iron / Copnic	-200 sampai +860	1000	60 @ 0
Chromel P / Alumel	-200 sampai 1200	350	40-55 between
W95Re5 / W26Re7	0 to 2316		

Selain berdasarkan sensitifitas materialnyanya, termokopel juga dibedakan berdasarkan warna dan penggunaan dengan menggunakan kode-kode tertentu. Sistem klasifikasi termokopel ini diatur dalam *American National Standards Institute* (ANSI) dan juga *American Standard Testing and Material* (ASTM) seperti yang terlihat pada **Tabel 2.3** di bawah:

Tabel 2.3 Standar Thermocouple (ASTM dan ASNI)

Tipe T/C	POS	Nama Dagang dan Umum	Magnetik		Insulasi			Plug dan Jack
	NEG		Ya	Tidak	Single Conductor	Overall T/C Wire	Overall External Gradewire	
B	BP	Platinum 30% Rhodium		x	Abu-abu		Abu-abu	Putih (terkompensasi)
	BN	Platinum 6% Rhodium		x	Merah			
C	CP	Tungsten 5% Rhenium		x	Hijau		Merah	Coklat
	CN	Tungsten 26% Rhenium		x	Merah			
E	EP	Chromel (Ni-Cr)		x	Ungu	Coklat	Ungu	Ungu
	EN	Constantan (Cu-Ni)		x	Merah			
J	JP	Besi	x		Putih	Coklat	Hitam	Hitam
	JN	Constantan (Cu-Ni)		x	Merah			
K	KP	Chromel (Ni-Cr)		x	Kuning	Coklat	Kuning	Kuning
	KN	Alumel	x		Merah			
M*	MP	Nikel 18% Molybdenum		x	N/A		Catatan 1	Kuning
	MN	Nikel 0,8% Karbon		x	N/A			
N*	NP	Nicrosil		x	Orange	Coklat	Orange	Orange
	NN	Nisil		x				
P*	PP	Platinel 5355		x	N/A		Catatan 2	Kuning/Hitam
	PN	Platinel 7674		x	N/A			
R	RP	Platinum 13% Rhodium		x	Hitam		Hijau	Hijau
	RN	Platinum		x	Merah			
S	SP	Platinum 10% Rhodium		x	Hitam		Hijau	Hijau
	SN	Platinum		x	Merah			
T	TP	Tembaga		x	Biru	Coklat	Biru	Biru
	TN	Constantan (Cu-Ni)		x	Merah			

Keterangan :

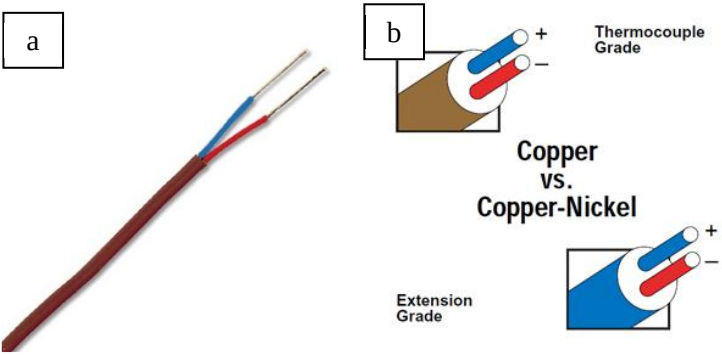
*standar non-ANSI/ASTM

Catatan 1 : Penggunaan Tipe K umumnya pada temperatur di bawah 121°C. Untuk temperatur di atasnya, Tipe M akan digunakan untuk keseluruhan. Penggunaan Tipe K hanya sebagai standar latihan.

Catatan 2 : Penggunaan Tipe K sangat tidak dianjurkan. Jenis kabel ekstensi platinel harus digunakan untuk keseluruhan.
Penggunaan Tipe K hanya untuk standar latihan.

2.2 Thermocouple type-T

Termokopel Tipe-T (**Gambar 2.3**) merupakan termokopel dengan material tembaga pada kutub positif dan constantan (55Cu-45Ni) pada kutub negatif.. Termokopel tipe ini memiliki ketahanan korosi yang baik pada atmosfer lembab dan cocok digunakan untuk pengukuran pada temperatur di bawah nol derajat. Penggunaannya pada udara terbuka maupun pada lingkungan oksidasi terbatas sampai 370°C karena di atas temperatur tersebut terjadi oksidasi dari termoelemen tembaga. Termokopel jenis ini dapat digunakan pada temperatur yang lebih tinggi dengan atmosfer berbeda.



Gambar 2.3 Termokopel Tipe-T (a) Kabel Termokopel (b) Skema Kabel Termokopel Tipe-T (ITS-90 N.I.S.T., 2008)

Termokopel ini dapat digunakan pada atmosfer yang berbeda-beda, baik itu vakum, oksidasi, reduksi, maupun inert dengan range temperatur penggunaannya berada di -200 sampai 370°C. Penggunaan di luar batas atas dari range tersebut biasanya

terbatas dikarenakan unsur tembaga yang mengalami oksidasi. (ASTM International, 1993)

2.3. Seebeck Coefficient

Perbedaan temperatur pada dua titik pada suatu konduktor atau semi-konduktor yang berbeda menghasilkan perbedaan arus antara dua titik tersebut. Dengan kata lain, gradien temperatur pada sebuah konduktor atau semi-konduktor memberikan perbedaan pada medan listrik material. Fenomena ini disebut *Seebeck effect* atau efek termoelektrik. Koefisien Seebeck mengukur besaran dari efek tersebut. Tegangan termoelektrik yang meningkat per satuan perbedaan temperatur pada sebuah konduktor disebut koefisien Seebeck. Atau dengan kata lain, perbedaan potensial, ΔV, di sepanjang logam yang disebabkan perbedaan temperatur, ΔT, disebut koefisien Seebeck (**Pers. 2.2**). Untuk mengukur koefisien ini digunakan persamaan umum:

$$S = \frac{dV}{dT} \tag{2.2}$$

Hanya arus Seebeck dari dua metal berbeda yang dapat diukur. Prinsip termokopel didasarkan pada efek Seebeck ini. (Kasap, 1997)

Koefisien S secara umum mengacu pada kekuatan termoelektrik meskipun istilah ini sering disalahartikan karena koefisien Seebeck secara harafiah merupakan perbedaan arus dan bukan kekuatan. Akan tetapi istilah ini sudah menjadi istilah paling umum dan dianggap benar. S adalah sifat material yang bergantung pada temperatur; S = S(T). Hal ini ditabulasikan pada banyak material sebagai fungsi temperatur. Untuk koefisien Seebeck, S(T), dari suatu material, perbedaan arus di antara dua titik di mana temperaturnya adalah T_o dan T_1, dari **Persamaan 2.2** diberikan oleh **Persamaan 2.3** berikut

$$\Delta V = \int_{T_o}^{T} S dT \tag{2.3}$$

Perbedaan arus pada Pers. 2 di atas adalah untuk bagian dengan temperatur yang lebih rendah menuju temperatur yang lebih tinggi seperti konvensi untuk S.

Efek Seebeck umumnya diaplikasikan pada penggunaan termokopel yang menggunakan dua logam berbeda di mana satu ujung dipertahankan pada temperatur acuan (T_0) dan ujung satunya digunakan pads temperatur yang lain (T). Tegangan di sepanjang logam bergantung pada koefisien Seebeck-nya sehingga perbedaan potensial di antara dua kabel akan bergantung pada S_A-S_B. energi elektromagnetik (emf) dia antara dua kabel jika didasarkan pada **Pers. 2.3** akan menjadi **Persamaan 2.4** sebagai berikut

$$V_{AB} = \int_{T_0}^{T} (S_A - S_B) dT = \int_{T_0}^{T} S_{AB} dT \tag{2.4}$$

Di mana $S_{AB} = S_A - S_B$ didefenisikan sebagai kekuatan termoelektrik untuk pasangan termokopel A-B. Untuk termokopel chromel-alumel (Tipe-K) misalnya, $S_{AB} = 40\mu V\ K^{-1}$ pada temperatur 300 K. (Kasap, 1997)

2.4 Tembaga

Penggunaan tembaga dan paduannya sudah berlangsung sejak ribuan tahun yang lalu oleh manusia. Dapat dianggap bahwa tembaga adalah logam tertua yang diekstraksi dan diproses oleh manusia. Dengan kekuatan dan keuletan yang baik, serta mudah untuk diproses dan ketersediaan yang banyak, tembaga menjadi material yang baik untuk dijadikan objek-objek tertentu, perhiasan, dan peralatan sehari-hari atau komponen-komponen yang menggunakan teknologi tinggi.

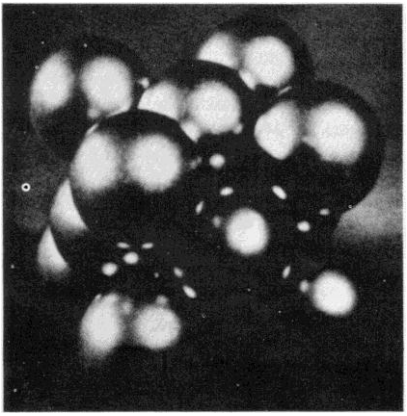
Sebelum digunakan, tembaga harus mengalami beberapa proses terlebih dahulu. Ketika didaur ulang, tembaga dapat mengalami proses yang sama berulang-ulang. Di alam, tembaga dalam bentuk murni cukup sering ditemukan. Secara metalurgi dari bijih, di mana senyawa kimia dari tembaga dan oksigen, sulfur, dan unsur lainnya ditemukan dalam: *chalcopyrite* ($CuFeS_2$) – mengandung sekitar 34.5 %wt tembaga; *azurite*

($Cu_3[OH\text{-}Co_3]_2$) dan *malachite* ($Cu_2[OH\text{-}Co_3]_2$) – karbonat tembaga bersifat alkali; *cuprite* (Cu_2O) – oksida tembaga.

Pada masa sekarang, tembaga digunakan dalam fase murninya dan umumnya diaplikasikan pada peralatan yang membutuhkan konduktivitas termal dan likstrik yang tinggi, sedangkan paduannya (kuningan dan perunggu) secara luas digunakan dalam beberapa bidang karena sifat tahan korosi dan tahan aus yang tinggi. Hingga saat ini, tembaga dan paduannya masih menjadi sumber daya alam yang penting untuk perkembangan kehidupan manusia. (Collini,L., 2012)

2.4.1 Sifat Tembaga

Tembaga adalah logam non-polimorf dengan kisi *face centered cubic* (FCC) seperti yang terlihat pada **Gambar 2.4**. Tembaga yang murni berwarna kemerahan, dimana jika dicampur dengan seng akan menghasilkan warna kekuningan, dan jika diberikan penambahan nikel akan menghasilkan warna perak. (Skočovský et al., 2000, 2006)



Gambar 2.4 Struktur Kristal Tembaga (Flinn,1961)

Tembaga memiliki nomor atom 29 dan merupakan bagian dari kelompok IB pada table periodic. Tembaga berada pada grup yang sama dengan beberapa "logam mulia" seperti emas dan perak, di mana tembaga memiliki sifat yang sama seperti keuletan yang tinggi dan sifat kimia yang stabil. Tembaga memiliki massa atom sebesar 63,546 dan konduktivitas tepat 58 m/Ω mm^2. (Cowie, John., 2016). Untuk sifat lenih spesifik dari tembaga dapat kita lihat pada **Tabel 2.4**.

Tabel 2.4 Sifat Fisik dan Mekanik dari Tembaga (Ross, 1992)

Atomic number	27
Atomic weight	63.54
Crystal structure	Face-centred cubic
Colour	Reddish orange
Specific gravity	8.96
Density	8960 kg/m3
Melting point	1083°C
Boiling point	2582°C
Specific heat	*0.385 Jig* °C
Thermal conductivity	*385 W/m* °C
Electrical conductivity	100% lACS (copper 100%)
Specific resistance	17 microhm mm
Temperature coefficient of electrical resistance	0.0039/°C
Young's modulus of elasticity	110 X 109 *N/m2*
Tensile strength	annealed 210 N/mm2
Hardness	annealed 50 DPN
	cold worked 100 DPN

Sifat-sifat yang pada umumnya dianggap sebagai keunggulan tembaga (Kutz, Myer., 2006) antara lain sebagai berikut:

1. Konduktifitas termal dan listrik yang bagus
2. Kombinasi kekuatan dan keuletan yang baik
3. Mudah difabrikasi (*machinability*, *castability*, serta *weldingability*)
4. Memiliki ketahanan korosi yang tinggi
5. Memiliki penampilan estetika yang baik

2.4.2 Klasifikasi Tembaga dan Paduannya

Sistem penamaan Unified Numbering System (UNS) merupakan sistem penamaan yang diterima secara luas untuk produk *wrought copper*, *cast copper*, dan paduan tembaga. Penamaannya biasanya dapat diketahui dengan 5 digit angka yang dimulai dengan huruf "C". Sistem penamaan ini didasarkan pada sistem penamaan sebelumnya yang menggunakan 3 digit angka dalam industri tembaga di Amerika Serikat. Sebagai contoh, *Copper Alloy* No. 377 menjadi C37700 dalam sistem penamaan UNS. Sistem penamaan ini didaftarkan oleh *Copper Association Development* (CDA). Penamaan ini kemudian disusun oleh *American Society for Testing Materials* (ASTM) dan *Society of Automotive Engineers* (SAE). Penamaan range C10000 sampai C79999 merupakan penamaan yang digunakan untuk *wrought copper*, sedangkan range C80000 sampai C99999 merupakan penamaan untuk *cast alloy*. (Cowie, John., 2006)

Pembagian kategori ini kemudian diatur dalam *American Society of Metals International* (ASM International) yang dapat dilihat Pada **Tabel 2.5** dan **Tabel 2.6**.

Tabel 2.5 Klasifikasi *Wrought Alloys* (ASM International (2001)

Wrought Alloys	No.UNS	Komposisi
Coppers (a)	C10100-C15815	> 99% Cu
High-copper alloys (b)	C16200-C19900	> 96% Cu

Brasses	C20100-28000	Cu-Zn
Leaded brass	C31200-C38500	Cu-Zn-Pb
Tin brasses	C40400-C48600	Cu-Zn-Sn-Pb
Phosphor bronzes	C50100-C52480	Cu-Sn-P
Leaded phosphor bronzes	C53400-C54400	Cu-Sn-Pb-P
Copper-phospphorus and copper-silver-phosphorus alloy (c)	C55180-C55284	Cu-P- Ag
Aluminium bronzes	C60800-C64210	Cu-Al-Ni-Fe-Sn
Silicon bronzes	C64700-C66100	Cu-Si-Sn
Copper-zinc alloys	C66300-C69710	Cu-Zn-Mn-Fe-Sn-Al-Si-Cu
Copper nickels	C70100-C72950	Cu-Ni-Fe
Wrought Alloys	**No.UNS**	**Komposisi**
Nickel silvers	C73500-C79830	Cu-Ni-Zn

Tabel 2.6 Klasifikasi *Cast Alloys* (ASM International (2001)

Cast Alloys	**No.UNS**	**Komposisi**
Coppers (a)	C80100-C81200	> 99% Cu
High-copper alloys (d)	C81400-C82800	> 94% Cu
Red and leaded red brasses	C83300-C83810	Cu-Sn-Zn-Pb (82-94% Cu)
Semi-red and leaded semi-red brasses	C84200-84800	Cu-Sn-Zn-Pb (75-82% Cu)
Yellow and leaded yellow brasses	C85200-C85800	Cu-Zn-Pb
Manganese bronzes and leaded manganese bronzes (e)	C86100-C86800	Cu-Zn-Mn-Fe-Pb
Silicon brasses/bronzes	C87300-C87800	Cu-Zn-Si
Copper-bismuth and	C89320-C89940	Cu-Sn-Bi-Se

copper-bismuth-selenium alloys		
Tin bronzes	C90200-C91700	Cu-Sn-Zn
Leaded tin bronzes	C92200-94500	Cu-Sn-Zn-Pb
Nickel-tin bronzes	C94700-C94900	Cu-Ni-Sn-Zn-Pb
Aluminium bronzes	C95200-C95900	Cu-Al-Fe-Ni
Copper nickels	C96200-C96950	Cu-Ni-Fe
Nickel silvers	C97300-C97800	Cu-Ni-Zn-Pb-Sn
Leaded coppers	C98200-C98840	Cu-Pb
Special alloys	C99300-C99750	Cu-Zn-Mn-Al-Fe-Co-Sn-Pb

Keterangan :
(a) Komposisi Cu $\geq$ 99,3 %
(b) Komposisi Cu $\leq$ 99,3 %
(c) Paduan logam pengisi
(d) *High Alloy Cast* $\geq$ 94,0 %
High-Strength and Leaded High-Strength Yellow Brasses

2.4.3 Unsur Pemadu Utama Tembaga

Satu lagi sistem klasifikasi tembaga yang sering digunakan adalah klasifikasi berdasarkan unsur pemadunya. Secara umum, pengklasifikasian tembaga berdasarkan terbagi atas 6 kelas pemadu utama, antara lain: *coppers*, *high-copper alloys*, *brasses*, *bronzes*, *copper nickels*, dan *nickel silvers* seperti yang terlihat pada **Tabel 2.7**.

Tabel 2.7 Copper Alloy Berdasarkan Unsur Pemadu Utamanya (ASM International, 2001)

Family	Unsur Pemadu	Solud Solubility pada % (20°C)
Brasses...	Zinc	37
Phosphor bronzes...	Tin	9
Aluminium	Aluminium	19

bronzes...		
Silicon bronzes...	Silicon	8
Copper-nickels,nickel silvers...	Nickel	100

Tembaga murni merupakan tembaga yang paling banyak penggunaannya secara komersial karena memiliki keuletan dan memiliki impuritas yang sangat sedikit (kurang dari 0,7% total impuritas). High-copper alloys mengandung sedikit unsur pemadu, seperti berilium, kadmium, krom, atau besi, yang tiap unsurnya memiliki solubilitas kurang dari 8%. Adanya unsur pemadu ini bertujuan untuk memodifikasi sifat-sifat dasar tembaga. Setiap kelompok logam lainnya mengandung 1-5 unsur pemadu sebagai unsur pemadu utamanya. (ASM International, 2001)

2.4.4 Aplikasi Tembaga

Penggunaan tembaga untuk pertama kali diperkirakan dimulai ada 8500 SM, didapati dari artefak-artefak yang ditemukan di sekitar Asia Kecil. Sedangkan untuk paduan tembaga dipergunakan pertama kali di Mesopotamia pada 3500 SM, yaitu pemaduan dengan timah (Zaman Perunggu) dan kemudian dipadukan dengan seng, yang digunakan sebagai material utama untuk perhiasan, perkakas rumah tangga, dan juga untuk persenjataan. (Kutz, Myer., 2006)

Untuk penggunaan umum dari tembaga dan paduannya berdasarkan *Unified Numbering System* (UNS), dapat diihat **pada Tabel 2.8** dan **Tabel 2.9**.

Tabel 2.8 Sifat dan Aplikasi Umum dari *Wrought Copper* dan *Brass* (Kalpakjian, 2009)

Type and UNS number	Nominal composition (%)	Ultimate tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation in 50 mm (%)	Typical applications
Electrolytic tough-pitch copper (C11000)	99.90 Cu, 0.04 O	220–450	70–365	55–4	Downspouts, gutters, roofing, gaskets, auto radiators, bus bars, nails, printing rolls, rivets
Red brass, 85% (C23000)	85.0 Cu, 15.0 Zn	270–725	70–435	55–3	Weather stripping, conduits, sockets, fasteners, fire extinguishers, condenser and heat-exchanger tubing
Cartridge brass, 70% (C26000)	70.0 Cu, 30.0 Zn	300–900	75–450	66–3	Radiator cores and tanks, flashlight shells, lamp fixtures, fasteners, locks, hinges, ammunition components, plumbing accessories
Free-cutting brass (C36000)	61.5 Cu, 3.0 Pb, 35.5 Zn	340–470	125–310	53–18	Gears, pinions, automatic high-speed screw machine parts
Naval brass (C46400 to C46700)	60.0 Cu, 39.25 Zn, 0.75 Sn	380–610	170–455	50–17	Aircraft: turnbuckle barrels, balls, bolts; marine hardware: propeller shafts, rivets, valve stems, condenser plates

Tabel 2.9 Sifat dan Aplikasi Umum dari *Wrought Bronze* (Kalpakjian, 2009)

Type and UNS number	Nominal composition (%)	Ultimate tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation in 50 mm (%)	Typical applications
Architectural bronze (C38500)	57.0 Cu, 3.0 Pb, 40.0 Zn	415 (as extruded)	140	30	Architectural extrusions, storefronts, thresholds, trim, butts, hinges
Phosphor bronze, 5% A (C51000)	95.0 Cu, 5.0 Sn, trace P	325–960	130–550	64–2	Bellows, clutch disks, cotter pins, diaphragms, fasteners, wire brushes, chemical hardware, textile machinery
Free-cutting phosphor bronze (C54400)	88.0 Cu, 4.0 Pb, 4.0 Zn, 4.0 Sn	300–520	130–435	50–15	Bearings, bushings, gears, pinions, shafts, thrust washers, valve parts
Low-silicon bronze, B (C65100)	98.5 Cu, 1.5 Si	275–655	100–475	55–11	Hydraulic pressure lines, bolts, marine hardware, electrical conduits, heat-exchanger tubing
Nickel silver, 65–10 (C74500)	65.0 Cu, 25.0 Zn, 10.0 Ni	340–900	125–525	50–1	Rivets, screws, slide fasteners, hollowware, nameplates

2.5 Nikel

2.5.1 Sejarah Nikel

Nikel telah digunakan sejak dari awal peradaban manusia. Analisa kimia dari artefak-artefak menunjukkan bahwa senjata, peralatan-peralatan, dan juga koin mengandung nikel dengan kadar tertentu. Kemungkinan besar, penggunaan paling awal dari nikel adalah Pai-Thong atau tembaga putih. Material yang dibuat di Cina ini ditambahi dengan seng terhadap bijih nikel-tembaga. Banyak ornamen-ornamen dekoratif seperti wadah lilin diproduksi dan pada akhirnya dibawa ke Eropa oleh *East India Company* pada abad ketujuh belas. (International Nickel Company, 1957)

Dan pada awal abad kedelapan belas, penambang di regional Saxony di Jerman mencoba untuk meleburkan beberapa mineral/bijih menyerupai tembaga yang baru ditemukan. Mereka menemukan bahwa logam putih yang mereka produksi terlalu keras untuk digunakan untuk dibentuk menjadi barang-barang yang berguna. Para penambang mengira bahwa material tersebut terkena kutukan dan menyeburnya senagai *Old Nick's Copper* atau "Kupfer-Nickel. Bijih yang sama ditemukan ditemukan di tempat yang berbeda beberapa tahun kemudian, dan material ini juga disebut dengan nikel karena logam putih yang keras tersebut sangat sulit untuk dibentuk.

Seorang ilmuwan bernama A. F. Cronstedt, yang bekerja untuk *Swedish Departmenet of Mines*, melakukan penelitian selama lima tahun terhadap material mencurigakan tersebut dan akhirnya dapat memisahkan dan mengidentifikasi unsur baru yang dia namakan nikel. Lima tahun kemudian setelah identifikasinya pada tahun 1751, iluwan Swedia lainnya bernama Von Engestrom, menemukan bahwa nikel merupakan penyusun utama dari Pai Tong dan memicu dalam ditemukannya *German silver* atau nikel-perak (paduan Cu-Sn-Pb-Zn mengandung 12-25 wt% Ni). (ASM International, 2001)

2.5.2 Sifat-sifat Nikel

Nikel adalah unsur dengan nomor atom 28 dan disimbolkan dengan Ni. Nikel murni besifat tangguh dan berwarna putih kesilveran yang memiliki konduktifitas listrik dan panas yang tinggi. Titik lebur logam ini mencapai 1455°C. Struktur kristalnya yang berupa FCC membuat metal ini memiliki keuletan yang baik dan fabrikasi nikel menggunakan pengerjaan panas dan dingin. Layaknya besi dan kobal, nikel bersifat *ferromagnetic*. Nikel murni bersifat tahan korosi pada temperatur ruangan (Cardarelli, 2008). **Tabel 2.10** menujnjukkan sifat fisik nikel.

Tabel 2.10 Sifat fisik dan sifat mekanik nikel (Ni) (Cardarelli, 2008)

Struktur Kristal	FCC
Massa Jenis (g/cm3)	8.90
Massa Atom	28
Nomor Atom	58.69
Titik Lebur	1455 °C
Brinell Hardness	85-109 HB
Yield strength proof 0.2%	148 MPa
Ultimate tensile strength	462 MPa
Elongation	48%

Di alam, nikel berbentuk mineral sebagai pentlandit, pyrrhotit, millerit, niccolit dll. Proses pemurnian nikel menggunakan *elektrolit refining* dan proses karbonil. Kandungan nikel sebagai paduan berkisar antara 32.5-99.5%. Paduan nikel dapat diklasifikasikan menjadi dua grup. Grup pertama berdasarkan sifat tahan korosi nikel dan paduan nikel dengan kromium sebagai paduan passivating seperti pada *stainless steel* (Cardarelli, 2008)

2.5.3 Klasifikasi Nikel dan Paduannya

Nikel dan paduan nikel yang dikomersialkan pada umumnya memiliki fasa *full-austenite* dan umumnya digunakan karena memiliki sifat ketahanan yang baik pada temperatur dan korosi pada keadaan basah. (ASM International, 2001) Meskipun nama jual umumnya digunakan sampai sekarang, akan tetapi nikel dan paduannya sekarang diidentifikasi dalam UNS dengan kode huruf N. Beberapa nama dagang yang umum untuk nikel antara lain:

- **Monel**, yaitu paduan nikel-tembaga
- **Inconel**, yaitu paduan nikel-krom dengan kekuatan tarik mencapai 1400 Mpa.
  Hastelloy juga merupakan paduan nikel-krom dengan ketahanan korosi yang baik dan memiliki kekuatan yang tinggi pada temperatur yang meningkat.
- **Nichrome**, yaitu paduan antara nikel, krom, dan besi. Paduan ini memiliki resistansi listrik yang tinggi dan resistansi terhadap oksidasi yang tinggi. Umumnya digunakan untuk peralatan pemanas listrik.
- **Invar** dan **Kovar**, merupakan paduan antara besi dan nikel. Paduan ini memiliki sensitifitas yang relatif rendah terhadap perubahan temperatur.
- **Alumel**, merupakan paduan antara nikel, mangan, aluminum, dan silikon.
- **Chromel**, yaitu paduan antara nike dan krom.
- **Cupronickel**, yaitu paduan antara nikel dan tembaga.
- **German silver**, merupakan paduan antara nikel, tembaga, dan seng.
- **Mu-metal**, merupakan paduan antara nikel dan besi.
- **Ni-C**, merupakan paduan antara nikel dan karbon.
- **Nicrosil**, merupakan paduan antara krom, silikon, dan magnesium.

- **Nisil**, merupakan paduan antara nike dan silikon.
- **Nitinol**, merupakan paduan antara nikel dan titanium. (Kalpakjian, 2009)

Selain nama dagang, beberapa negara juga mengeluarkan sistem penamaan untuk paduan nikel. Dalam British Standards Institution (BS), penamaan nikel dan paduannya didasarkan pada spesifikasi tertentu dengan analisis dan bentuk yang terpisah. Penamaan ini sebagian besar telah ditarik sebagai sistem di mana master spesifikasi digunakan untuk meliputi satu bentuk seperti bar, sheet, dan lain-lain di mana tiap paduan yang berbeda diidentifikasi berdasarkan penyebutannya. Adapun daftar dari standar ini adalah:

BS 3071	Nickel and nickel alloy castings
BS 3072	Nickel and nickel alloy sheet
BS 3073	Nickel and nickel alloy strip
BS 3074	Nickel and nickel alloy tube
BS 3075	Nickel and nickel alloy wire
BS 3076	Nickel and nickel alloy rod and section

(British Standards Institution, 1998)

2.5.4 Aplikasi Nikel dan Paduannya

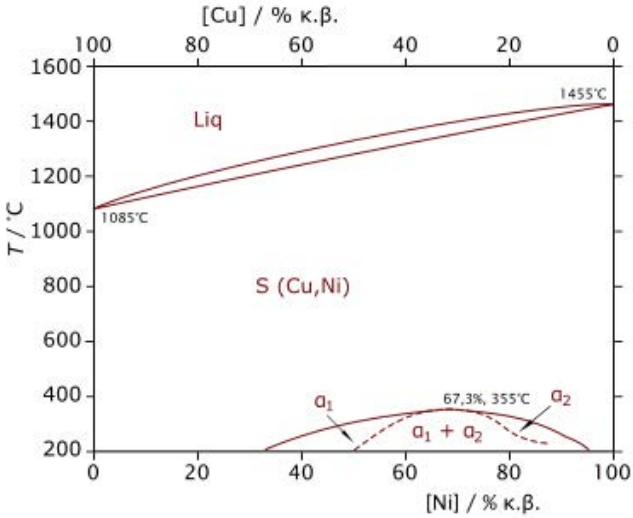
Nikel dan paduannya digunakan pada berbagai aplikasi, di mana sifat yang paling umum digunakan melibatkan ketahanan korosi dan/atau ketahanan panasnya. Beberapa aplikasi yang umum dari penggunaan nikel dan paduannya (ASM International, 2001) adalah sebagai berikut:

- *Aircraft gas turbines:* disks, ruang bakar, baut, casing, shafts, exhaust systems, cases, pisau turbin, vanes, burner cans, afterburners, thrust reversers
- *Steam turbine power plants:* baut, pisau turbin, stack gas reheaters

- *Reciprocating engines:* turbochargers, saluran buang, hot plugs, valve seat inserts
- *Metal processing:* hot-work tools and dies
- *Medical applications:* peralatan dokter gigi, prosthetic devices
- *Space vehicles:* aerodynamically heated skins, bagian mesin roket
- *Heat-treating equipment:* trays, fixtures, conveyor belts, baskets, fans, furnace mufflers
- *Nuclear power systems:* control rod drive mechanisms, valve stems, springs, ducting
- *Chemical and petrochemical industries:* bolts, fans, valves, reaction vessels, piping, pumps
- *Pollution control equipment:* scrubbers, flue gas desulfurization equipment (liners, fans, stack gas reheaters, ducting)
- *Metals processing mills:* ovens, afterburners, exhaust fans
- *Coal gasification and liquefaction systems:* heat exchangers, reheaters, piping

2.6 Paduan Tembaga-Nikel

Paduan tembaga-nikel merupakan paduan dengan fasa tunggal di seluruh komposisi pada diagram fasa dan banyak paduan standar yang ada pada fasa dan komposisi tertentu dari diagram fasa tersebut. Hal ini dikarenakan tembaga dan nikel larut sepenuhnya baik pada keadaan solid maupun cair, seperti yang terlihan pada **Gambar 2.5**. Penggunaannya biasanya ditambahi dengan unsur-unsur yang lain untuk tujuan khusus. Pedanmabahn nikel pada tembaga bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dan daya tahannya dan juga ketahanannya terhadap korosi, erosi, dan kavitasi pada daerah berair baik yang alami maupun tidak. Ketahanan paduan ini terhadap cacat natural membuatnya cocok diaplikasikan pada bidang kelautan dan lingkungan kimia untuk kapal, elemen penukar panas, sistem pipa bawah laut, dan lain-lain. (ASM International, 2001)



Gambar 2.5 Diagram Fasa Tembaga-Nikel (ASM International, 2001)

Paduan binari Cu-Ni dengan kadar nikel rendah (di bawah 10%) penggunaannya terbatas. Paduan ini biasanya digantikan oleh paduan tembaga yang lebih murah. Untuk paduan dengan kandungan nikel sedang (15-30%), penggunaannya didasarkan karena ketahanan korosi yang *cold formability* yang baik. Paduan dengan kadar nikel 15-20% biasanya digunakan untuk *deep-drawing*. Untuk paduan dengan kadar nikel 25% digunakan untuk produksi koin. Sedangkan paduan dengan kadar nikel 30% digunakan dalam industri kimia dan makanan. (Skočovský et al., 2000, 2006)

Paduan Cu-Ni dengan kadar nikel rendah sampai menengah sering disebut sebagai *radio alloy*. Paduan ini memiliki resistivitas yang sangat rendah dan koefisien resistansi temperatur (temperature coefficient of resistance/TCR) yang menengah. Resistivitas dari radio alloy akan meningkat seiring dengan meningkatnya kadar nikel, akan tetapi akan menurunkan TCR

nya. Komposisi dan sifat dari paduan ini dapat kita lihat pada **Tabel 2.11** di bawah. (ASM International, 2001)

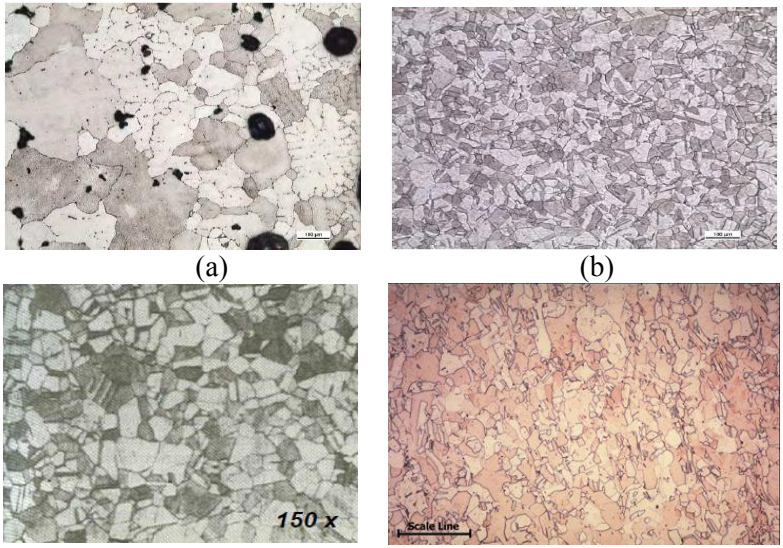
Tabel 2.11 Komposisi dan Sifat Paduan Cu-Ni (Radio Alloys) (ASM International, 2001)

Komposisi Dasar, %	Resistivity(a), nΩ · m(b)	TCR, ppm/°C©	Thermoelectric potential vs Cu, μV/°C	Coefficient of thermal expansion(d), μm/m · °C	Tensile strength(a)		Density(a)	
					Mpa	ksi	g/cm3	lb/in.3
98Cu-2Ni	50	1400 (25-105°C)	-13 (25-105 °C)	16.5	205-410	30-60	8.9	0.32
94Cu-6Ni	100	700 (25-105°C)	-13 (25-105 °C)	16.3	240-585	35-85	8.9	0.32
89Cu-11Ni	150	450 (25-105°C)	-25 (25-105 °C)	16.1	240-515	35-75	8.9	0.32
78Cu-22Ni	300	180 (25-105°C)	-36 (0-75 °C)	15.9	345-690	50-100	8.9	0.32

Keterangan:
a : pada temperatur 20°C
b : untuk mengkonversi ke Ω.circ mil/ft, kalikan dengan 0,6015
c : koefisien resistansi temperatur adalah $(R - R_0)/R_0(t-t_0)$, di mana R adalah resistansi pada t °C dan R_0 adalah resistanse pada temperatur acuan (t_0)
d : pada temperatur 25°C sampai 105°C

Paduan tembaga dan nikel memiliki struktur fasa tunggal alfa karena nikel larut sepenuhnya dalam tembaga. Dendrit hasil cor biasanya sangat berinti (**Gambar 2.6a**). Dendrit tersebut mengandung gradien komposisi, karena paduan membeku selama rentang temperatur yang luas. Struktur nikel cor terdiri dari dendrit alpha, yang memiliki kandungan nikel menurun dari pusat ke tepi dendrit itu. Daerah interdendritik, menjadi cairan terakhir ketika proses pembekuan, memiliki kadar tembaga lebih tinggi. Perlakuan mekanik memecah struktur dendritik, tapi meskipun perlakuan mekanik dan termal yang diulang-ulang tidak

menyeragamkan elemen paduan. Pemisahan elemen paduan, yang dimulai sebagai *coring* dari dendrit, terlihat seperti belang di mikrostruktur *wrought nickel*. Mikrostruktur material tempa mirip dengan tembaga tanpa paduan, terdiri dari butiran kembar alpha tembaga (**Gambar 2.6b**). Penampakan dari elemen paduan muncul sebagai baris gelap atau garis-garis di seluruh butiran. (Collini, 2012)

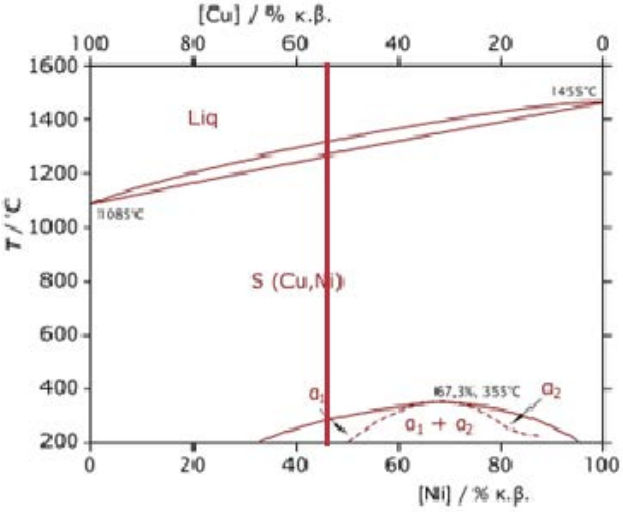


Gambar 2.6. Struktur Mikro paduan Cu-Ni **(a)** Tembaga cor dengan ukuran butir yang berbeda karena laju pendinginan cepat **(b)** Tembaga tempa dengan butiran polihedral yang seragam dan anil kembar* **(c)** 70Cu-30Ni yang terdiri dari rekristalisasi butir-α dengan *twin band* **(d)** 90Cu-10Ni dengan perlakuan anil* (*Collini, 2012; ASM International, 2004)

2.6.1 Constantan

Constantan telah menjadi istilah umum untuk paduan yang memiliki resistivitas menengah dan koefisien resistansi

temperatur (temperature coefficient of resistance/TCR) yang rendah. Secara nominal, constantan adalah paduan dengan kadar 55Cu-45Ni pada diagram fasa, seperti yang terlihat pada **Gambar 2.7** namun komposisinya dapat bervariasi mulai dari 50Cu-50Ni sampai sekitar 65Cu-35Ni, seperti yang dapat kita lihat pada **Tabel 2.12**.



Gambar 2.7 Diagram Fasa Constantan (ASM International, 2001)

Koefisien temperatur dari constantan biasa berada pada ±20 ppm/^{o}C pada temperatur lingkungan. Akan tetapi, perbedaan TCR pada range temperatur rendah (-55-25°C) dan temperatur tinggi (25-100°C) sekitar 200 ppm. Maka, spesifikasi pada ±20 ppm/^{o}C biasanya digunakan untuk temperatur rendah saja, akan tetapi secara umum, untuk meliputi keduanya digunakan ±40 ppm/^{o}C. Untuk mengatasi masalah ini, penambahan sekitar 3% mangan (Mn) digunakan. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kerataan dari kurva resistensi temperatur dan menghasilkan TCR

± 20 ppm/°C dari range temperatur -55 ke 105°C. (ASM International, 2001)

Tabel 2.12 Komposisi dan Sifat Paduan Constantan (ASM International, 2001)

Komposisi Dasar, %	Resistivity(a), nΩ · m(b)	TCR, ppm/°C©	Thermoelectric potential vs Cu, µV/°C	Coefficient of thermal expansion(d), µm/m · °C	Tensile Strength (a)		Density(a)	
					Mpa	ksi	g/cm3	lb/in.3
57Cu-43Ni	500	±20 (25-105°C)	-43 (25-105 °C)	14.9	410-930	60-135	8.9	0.32
55Cu-45Ni	500	±40 (-55-105°C)	-42 (0-75 °)	14.9	455-860	66-125	8.9	0.32
53Cu-44Ni-3Mn	525	±70 (-55-105°C)	-38 (0-100 °C)	14.9	410-930	60-135	8.9	0.32

Keterangan:

a : pada temperatur 20°C

b : untuk mengkonversi ke Ω.circ mil/ft, kalikan dengan 0,6015

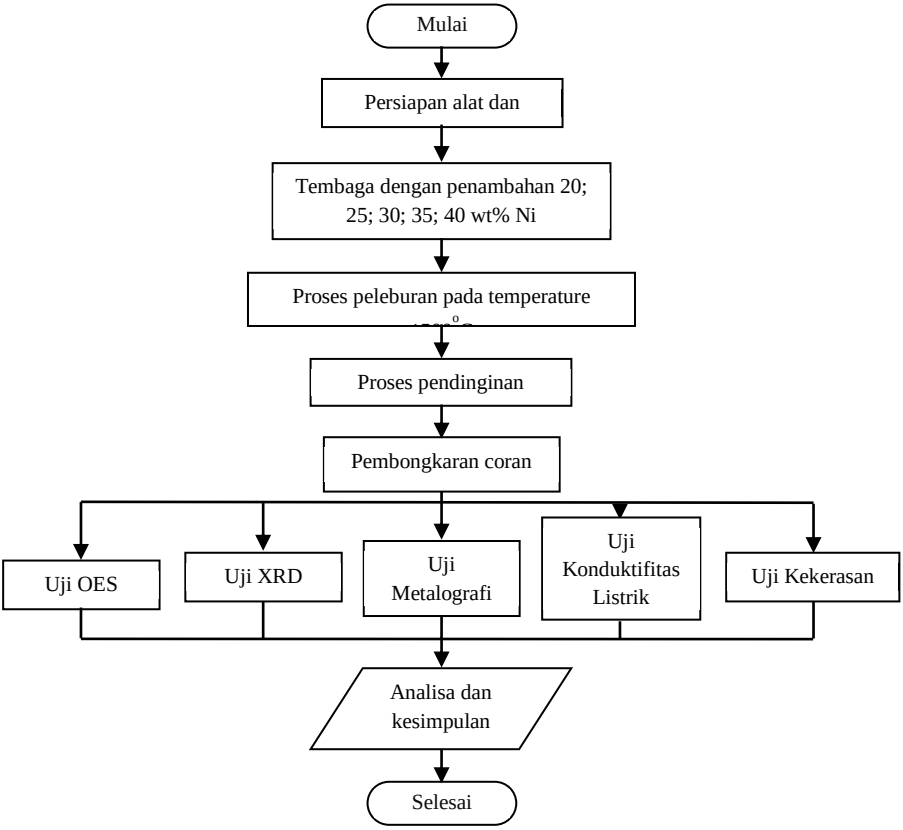
c : koefisien resistansi temperatur adalah $(R - R_0)/R_0(t-t_0)$, di mana R adalah resistansi pada t °C dan R_0 adalah resistanse pada temperatur acuan (t_0)

d : pada temperatur 25°C sampai 105°C

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Percobaan

Penelitian ini dilakukan mengikuti diagram alir sesuai **Gambar 3.1**. Penelitian ini dimulai dengan persiapan alat dan bahan. Setelah itu dilanjutkan dengan merancang variasi penambahan nikel. Selanjutnya, logam dilebur pada 1500 ºC.

Logam cair dituang dan didinginkan, setelah dingin coran dibongkar dan dilakukan pengujian OES, XRD, Konduktifitas Termal, Konduktifitas Listrik, dan Metalografi. Setelah itu hasil pengujian dianalisa dan ditarik kesimpulan.

3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian

3.2.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Tembaga (Cu)
   Tembaga yang digunakan merupakan tembaga murni kadar 99% dalam bentuk *rod* didapatkan dari PT. Sutindo. Tembaga Ditunjukkan pada **Gambar 3.2**

Gambar 3.2 Tembaga (Cu)

2. Nikel *sheet* (Ni).
   Nikel yang digunakan dalam penelitian ini berupa nikel dalam bentuk lembaran untuk aplikasi material elektronik. Kadar nikel pada material ini 99% sesuai dengan standar ASTM 162. Nikel ditunjukkan pada **Gambar 3.3**

Gambar 3.3 Nickel sheet

3. Bahan Etsa
   Bahan etsa yang digunakan dalam penelitian ini adalah etsa kode 34 yang sesuai dengan ASTM E-407 dengan komposisi sebagai berikut:
   a. 5gr $FeCl_3$,
   b. 50 ml HCl,
   c. 100 ml akuades

3.2.2 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:
1. Tungku (*furnace*)
Furnace yang digunakan dalam penelitian ini adalah burner furnace dengan bahan bakar gas LPG dan juga kokas, seperti yang terlihat pada **Gambar 3.4.**

Gambar 3.4 Burner furnace

2. Krus (*crucible*)

Krus yang digunakan berupa krus yang terbuat dari bahan grafit. Krus digunakan sebagai wadah paduan tembaga-nikel dalam proses peleburan, ditunjukkan pada **Gambar 3.5.**

Gambar 3.5 Krus (crucible)

3. Timbangan
Timbangan yang digunakan adalah milik Lab. Teknik Material dan Metalurgi ITS. Timbangan digunakan untuk menimbang massa bahan.

4. Kikir
Kikir yang digunakan adalah milik Lab. Teknik Material dan Metalurgi ITS. Kikir digunakan untuk meratakan permukaan spesimen.

5. Kertas Amplas
Kertas amplas didapatkan dari PT. Bahan Bangunan Keputih. Kertas amplas digunakan untuk grinding permukaan spesimen.

6. Gergaji
Gergaji yang digunakan adalah milik Lab. Teknik Material dan Metalurgi ITS. Gergaji tangan digunakan untuk memotong bahan.

7. Pengaduk
Digunakan untuk mengaduk paduan cair. Dibuat dengan baja tulangan yang ujungnya disambung dengan keramik.

8. Mesin *Grinding* & *Polishing*
Mesin *Grinding* & *Polishing* yang digunakan adalah milik Lab. Teknik Material dan Metalurgi ITS. Digunakan untuk mengikis permukaan spesimen agar rata dan halus.

9. OES (*Optical Emission Spectroscope)*
Alat ini digunakan untuk mengetahui komposisi kimia benda hasil coran. Pengujian komposisi kimia ini dilakukan dengan mesin Optical Emissions Spectroscopy

milik Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya seperti yang tampak pada **Gambar 3.6**

Gambar 3.6 Mesin Uji OES

10. Mesin XRD

Pengujian XRD dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro menggunakan mesin uji Shimidzu XRD-7000. Mesin digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristalin dalam material dengan cara menentukan parameter struktur kisi serta untuk mendapatkan ukuran partikel, seperti yang terlihat pada **Gambar 3.7**

Gambar 3.7 Mesin Uji XRD

11. Mikroskop Optik

Mikroskop optik yang digunakan adalah milik Lab. Teknik Material dan Metalurgi ITS menggunakan Olympus BX51. Mikroskop optik digunakan untuk melihat struktur spesimen dalam skala mikro seperti yang tampak pada **Gambar 3.8**

Gambar 3.8 Mikroskop Optik Olympus BX51

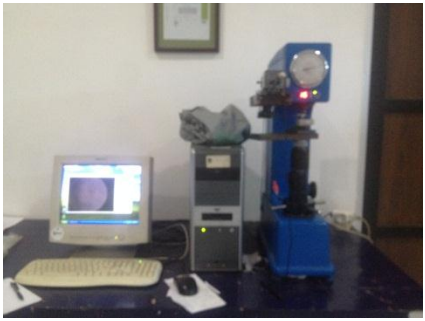
12. Alat *Four Point Probe* (FPP)

Alat ini digunakan untuk mengetahui konduktivitas listrik dari spesimen hasil coran. Mesin uji FPP yang digunakan merupakan milik Laboratoriun Sentral Mineral dan Material Maju FMIPA Universitas Negeri Malang seperti yang terlihat pada **Gambar 3.9**

Gambar 3.9 Mesin Uji Four Point Probe

13. Alat Uji Kekerasan

Alat ini digunakan untuk mengukur kekerasan spesimen. Mesin uji kekerasan yang digunakan adalah milik Lab. Teknik Material dan Metalurgi ITS. Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan metode uji kekerasan Brinell berdasarkan standar ASTM E10. Pengujian ini menggunakan bola baja dengan diameter 2,5 mm dan beban 62,5 kgf seperti yang tampak pada **Gambar 3.10**



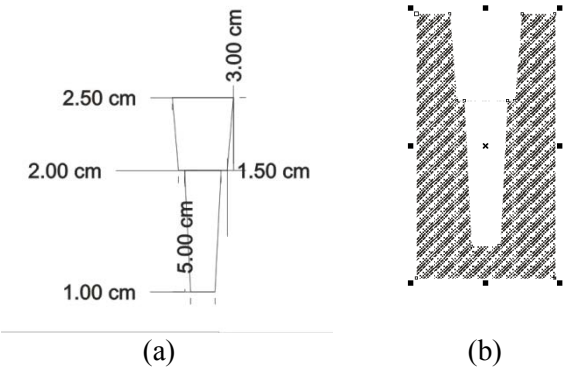
Gambar 3.10 Mesin Uji Kekerasan

3.3 Prosedur Percobaan

3.3.1 Persiapan Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Tembaga murni (Cu) yang kemudian ditambahkan unsur paduan Nikel (Ni) dengan kadar 20, 25, 30, 35, 40 dan 45 wt% Ni. Persiapan bahan mengikuti langkah-langkah sebagai berikut:

1. Kedua bahan disiapkan sebelum digunakan.
2. Menimbang Nikeldan Tembaga dengan variasi kadar pemadu 20, 25, 30, 35, 40 dan 45 wt% Ni, dan memasukkan ke dalam krus.
3. Memasukkan krus ke dalam *burner furnace* dan memanaskan hingga temperatur 1500°C tercapai dan dilakukan *holding* pada temperatur tersebut selama 30 menit.
4. Membuka *furnace* dan mengaduk paduan cair dengan menggunakan pengaduk selama beberapa saat.
5. Menuangkan *molten metal* ke dalam cetakan yang sudah didesain sesuai dengan **Gambar 3.11**.



Gambar 3.11 (a). Desain Spesimen Hasil Coran; (b) Desain Cetakan

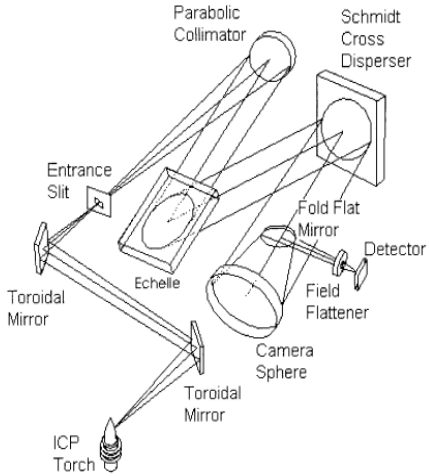
6. Mendinginkan paduan yang masih cair di dalam cetakan hingga mencapai temperature kamar.
7. Mengeluarkan paduan yang telah padat dari dalam cetakan.

3.3.2 Proses Pengujian

Penelitian ini dilakukan lima pengujian. Pengujian komposisi oleh OES, Pengujian metalografi untuk melihat strukturmikro. uji konduktifitas listrik untuk mengetahui nilai konduktifitas listriknya, dan uji XRD untuk mengetahui fasa yang terbentuk.

3.3.2.1 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian Komposisi kimia menggunakan *Optical Emission Spectroscopy (OES)*, adalah pengujian dengan menembakkan electron pada bidang datar specimen sehingga memantulkan gelombang cahaya yang unik yang dapat ditangkap oleh *receiver* dan sensor yang kemudian dicocokkan dengan database yang ada. Mekanisme OES seperti pada **Gambar 3.12**.



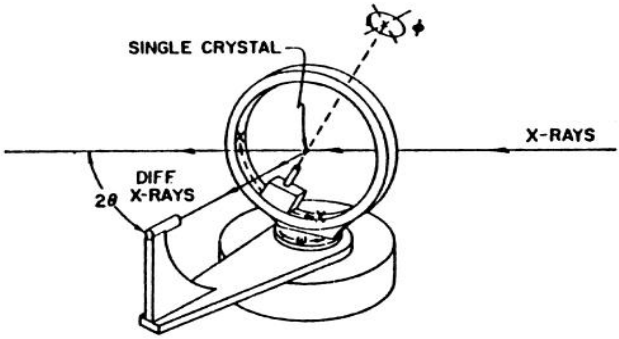
Gambar 3. 12 Prinsip pengujian OES (Boss, 2004)

OES dapat mengetahui kadar berbagai unsur tergantung dari database yang tersedia. Pada penelitian ini, pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui kadar tembaga dan nikel pada material hasil coran. Pengujian OES dilakukan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS). Dimensi minimal spesimen yang dibutuhkan untuk proses pengujian menggunakan OES yaitu lebar, panjang, dan ketebalan berturut-turut 1.5 cm, 1.5 cm, dan 0.5 cm.

3.3.2.2 Pengujian Fasa

Pengujian fasa dilakukan dengan menggunakan XRD. Analisa karakterisasi difraksi Sinar-X (XRD) dilakukan dengan tujuan mengidentifikasi transformasi fasa yang terbentuk pada paduan Cu-Ni yang sudah terbentuk selama proses melting.. Prinsip kerja pada pengujian XRD adalah ketika suatu material dikenai sinar X, maka intensitas sinar yang ditransmisikan lebih rendah dari intensitas sinar datang. Hal ini disebabkan adanya

penyerapan oleh material dan juga penghamburan oleh atom-atom dalam material tersebut. Berkas sinar X yang dihamburkan tersebut ada yang saling menghilangkan karena fasanya berbeda dan ada juga yang saling menguatkan karena fasanya sama. Berkas sinar X yang saling menguatkan itulah yang disebut sebagai berkas difraksi. **Gambar 3.13** menunjukkan pengujian XRD



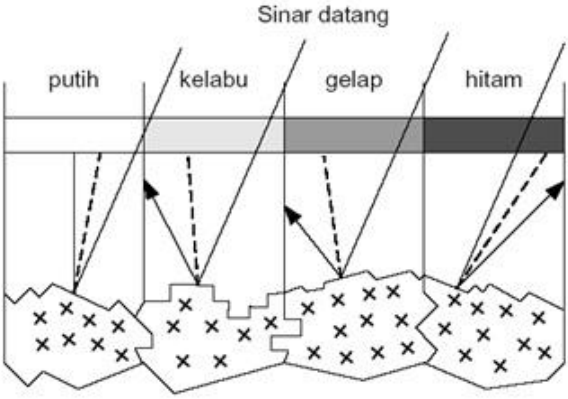
Gambar 3. 13 Prinsip kerja XRD (Kaufmann, 2003)

Pada penelitian ini, pengujian dilakukan dengan sudut 2Θ antara 30° – 90°. Ukuran sampel pada penelitian adalah 5x5x2 mm.

3.3.2.3 Pengujian Metalografi

Metalografi adalah suatu metode pengujian untuk melihat struktur logam pada skala mikro Hasil pengujian. Hal ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik dan mikroskop elektron. Struktur atau gambar logam yang terlihat melalui pengamatan dengan mikroskop disebut mikrostruktur. Struktur mikro yang terlihat akan dibandingkan dengan diagram fasa paduan. Pengamatan ini dilakukan untuk melihat pengaruh unsur paduan terhadap diagram fasa dan struktur mikronya. **Gambar 3.14** menunjukkan alur sinar datang pada pengamatan

Metalografi. Pada gambar ini terlihat daerah lingkup ukuran mikro struktur logam yang umumnya diamati dengan mikroskop.



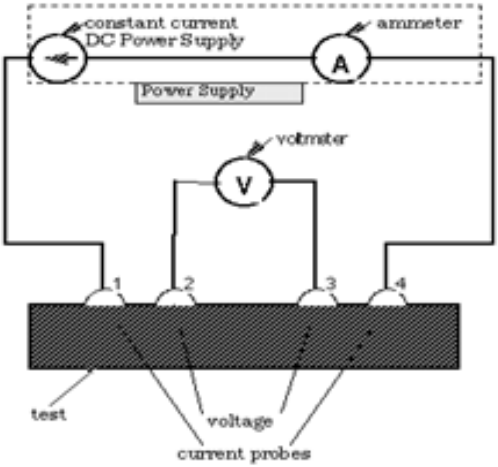
Gambar 3. 14 Alur sinar pada pengamatan metalografi (Kaufmann, 2003)

Larutan etsa yang digunakan sesuai ASTM E-407 yaitu menggunakan Etsa Kode 34 dengan komposisi 5gr $FeCl_3$, 50 ml HCl, dan 100 ml air. Proses etsa dilakukan dengan cara dicelup maupun diusap selama beberapa detik sampai beberapa menit.

3.3.2.5 Pengujian Konduktifitas Listrik

Alat uji konduktivitas listrik yang digunakan pada penelitian ini menggunakan metode *four-probe point* (probe 4 titik disingkat FPP).Alat ukur *four-point probe* adalah salah satu jenis alat yang biasa digunakan untuk mengukur nilai resistivitas suatu lapisan bahan elektronika. Seperti namanya, alat ukur ini didasarkan pada 4 buah probe dengan 2 probe berfungsi untuk mengalirkan arus listrik dan 2 probe yang lain untuk mengukur tegangan listrik sewaktu *probe-probe* tersebut dikenakan pada bahan (**Gambar 3.15**). Keempat titik kontak (*probe*) itu dibuat berderet dalam satu garis lurus dengan jarak antar probe diatur sedemikian rupa sehingga satu sama lain mempunyai jarak yang sama. Untuk menentukan serta mengkaji sifat-sifat bahan tersebut

dapat dilakukan dengan menentukan nilai kerintangan untuk suatu luasan dan ketebalan tertentu.



Gambar 3.15 *Setting* alat pengujian *four-probe point* (Wari, 2012)

Arus listrik yang konstan dialirkan sepanjang permukaan sampel melalui dua probe terluar. Jika sampel mempunyai resistansi, maka akan ada penurunan tegangan ketika arus mengalir sepanjang sampel tersebut. Perubahan tegangan tersebut diukur melalui dua probe bagian dalam. Besaran listrik yang menunjukkan kualitas konduktivitas bahan, seperti tegangan *output* dan arus *output* dapat ditentukan secara teliti dengan metode four-point probe. Dari perubahan ini akan diperoleh nilai kerintangan (resistivitas) dari material.

Resistivitas dari material dapat kita ketahui dengan persamaan berikut:

$$Resistivity = \frac{\pi}{ln\ 2}\left(\frac{V}{I}\right)/\left(\frac{L}{A}\right) \qquad (3.1)$$

dengan nilai konduktivitasnya adalah:

$$\sigma = \frac{1}{R} \tag{3.2}$$

Keterangan :

R = resistivitas (Ω.m)

$\frac{\pi}{\ln 2}$ = faktor pengali dengan ketebalan spesimen < dari jarak probe

L = panjang spesimen (m)

A = luas permukaan spesimen (m)

V = tegangan (volt)

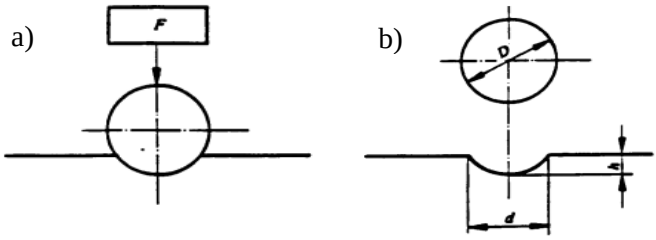
I = arus (ampere)

σ = konduktivitas listrik (S/m)

3.3.2.5 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan yang dilakukan yakni pengujian kekerasan dengan metode Brinell. Pengujian kekerasan Brinell mempunyai cakupan yang luas sehingga dapat digunakan untuk material yang sangat lunak maupun material yang sangat keras.

Pengujian kekerasan brinell dilakukan sesuai dengan standar ASTM E10. Diameter indentor yang digunakan sebesar 2,5 mm. Dengan pembebanan sebesar 62,5 kgf. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali pada tiga titik indentasi berbeda. Hasil dari ketiga indentasi akan dirata-ratakan untuk mendapat nilai kekerasan rata-rata dari paduan. **Gambar 3.15** menunjukkan mekanisme pengujian Brinell hardness.



Gambar 3. 16 Pengujian Brinell Hardness. a) ketika spesimen diberi pembebanan b) ketika beban dilepas (ASTM E10)

3.4 Rancangan Penelitian

Untuk memperoleh data yang sistematis, maka dari penelitian ini akan dibuat rancangan seperti pada **Tabel 3.1**

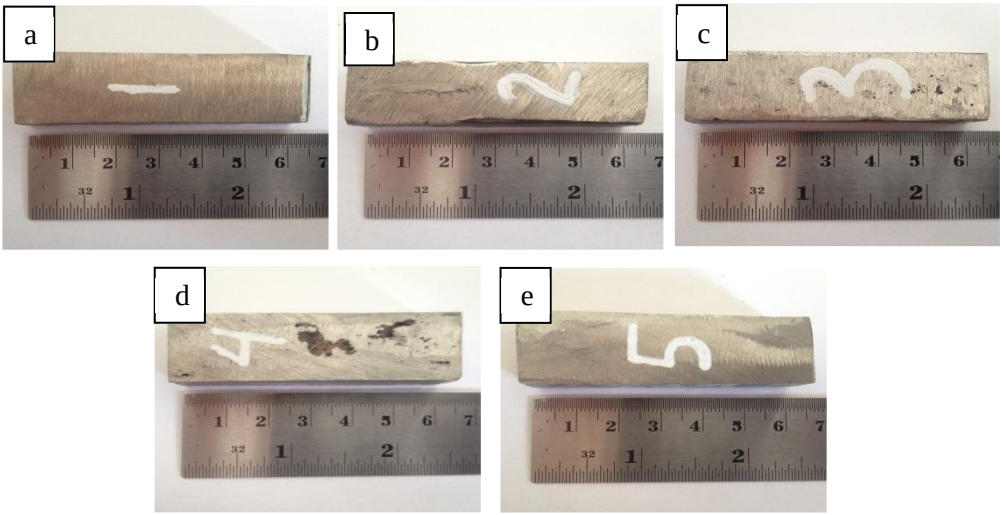
Tabel 3.1 Rancangan Penelitian

Material		Pengujian				
Cu (wt%)	Ni (wt%)	Uji OES	Uji XRD	Uji Metalografi	Uji Konduktivitas Listrik	Uji Kekerasan
80	20	V	V	V	V	V
75	25					
70	30					
65	35					
60	40					

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengamatan Makro Paduan Cu-Ni

Hasil proses peleburan paduan Cu-Ni dapat dilihat pada **Gambar 4.1**. Dimensi dari keempat paduan menyesuaikan dimensi dari cetakan. Setelah proses pemotongan, dimensinya menjadi sekitar 6x1,5x1,5 cm. Secara fisik kelima paduan memiliki kemiripian warna, yaitu warna perak. Berdasarkan ASTM International (2008), warna dari tembaga akan berubah seiring dengan bertambahnya kadar nikel, dan dengan penambahan sekitar 15%wt Ni, paduan tembaga-nikel akan berwarna putih keperakan.



Gambar 4.1 Hasil Coran Cu-Ni (a) 20 (b) 25 (c) 30 (d) 35 (e) 40 %wt Ni

Gambar 4.1a menunjukkan penampilan visual dari hasil peleburan paduan Cu-20Ni. Secara visual, penampilan fisik dari

paduan ini tidak menunjukkan adanya porositas dan penyusutan. Gambar 4.1b menunjukkan hasil peleburan paduan Cu-25Ni. Secara visual, penampilan fisik dari paduan ini tidak menunjukkan adanya porositas. Akan tetapi, paduan ini memiliki sedikit penyusutan. Gambar 4.1c menunjukkan hasil peleburan paduan Cu-30Ni. Secara visual, penampilan fisik dari paduan ini menunjukkan adanya porositas di beberapa titik. Tidak tampak penyusutan pada paduan ini. Gambar 4.1d menunjukkan hasil peleburan paduan Cu-35Ni. Paduan ini menunjukkan adanya porositas yang parah di bagian atas dan bagian dalamnya. Gambar 4.1e menunjukkan hasil peleburan paduan Cu-40Ni. Pada paduan ini tidak tampak adanya porositas maupun penyusutan.

Adanya porositas berhubungan langsung dengan cacat penyusutan (Tjitro, 2004). Timbulnya cacat penyusutan dapat diawali dengan terbentuknya cacat porositas. Cacat porositas dan penyusutan dapat terjadi karena beberapa faktor. Salah satu di antaranya adalah bentuk penampan. Pada penelitian ini tidak terdapat riser yang dipasang pada cetakan, sehingga memperbesar kemungkinan terjadinya kedua cacat tersebut. Faktor lain yang mempengaruhi terjadinya porositas dan penyusutan adalah keadaan cetakan yang kurang bagus. Cetakan yang kurang padat memiliki udara yang tersimpan di dalamnya sehingga pada saat proses penuangan udara ini akan menyembur keluar menuju tempat penuangan logam cair sehingga menimbulkan adanya porositas yang berlanjut pada penyusutan.

4.2 Komposisi Kimia Paduan Cu-Ni

Rancangan presentase unsur yang dimasukkan dalam proses peleburan ditunjukkan pada **Tabel 4.1**. Raw material yang digunakan dalam proses peleburan adalah tembaga dengan kadar 99% dan *nickel sheet* dengan kadar 99%.

Tabel 4.1 Komposisi Perhitungan Bahan Lebur (%wt)

Paduan	Cu	Ni
80Cu-20Ni	80	20
75Cu-25Ni	75	25
70Cu-30Ni	70	30
65Cu-35Ni	65	35
60Cu-40Ni	60	40

Tabel 4.2 menunjukkan komposisi kimia paduan Cu-Ni hasil proses peleburan. Terdapat perbedaan persentase unsur yang dimasukkan sebelum proses peleburan dengan hasil peleburan.

Tabel 4.2 Komposisi Paduan Cu-Ni hasil Pengujian OES (%)

Paduan	Cu	Ni	others
80Cu-20Ni	77.7	21.2	1.1
75Cu-25Ni	75.8	23.6	0.6
70Cu-30Ni	69.3	29.5	1.2
65Cu-35Ni	65.7	33.8	0.5
60Cu-40Ni	63.2	36.3	0.5

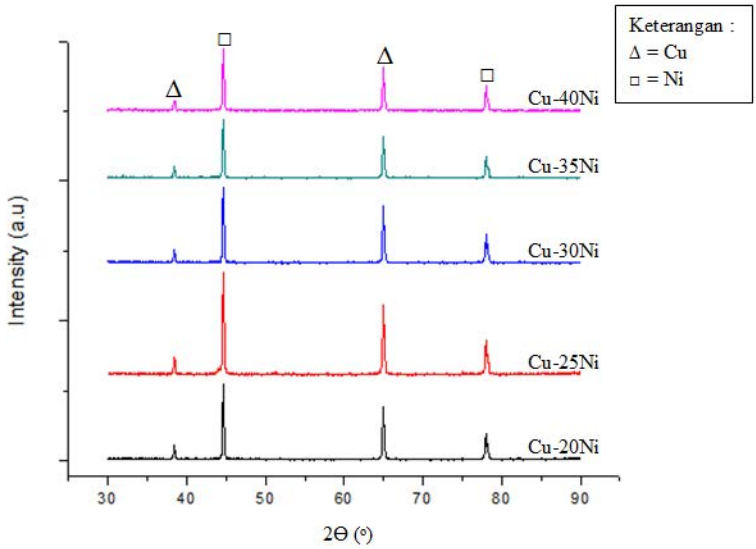
Unsur Cu dan Ni yang menjadi unsur paduan utama dalam penelitian ini tidak mengalami perubahan yang cukup banyak. Paduan Cu-20Ni mengalami kehilangan kadar Cu sebanyak 2,3% dan penambahan Ni sebanyak 1,2%. Paduan Cu-25Ni mengalami perubahan kadar Cu sebanyak 8% dan kadar Ni sebanyak 1,4%. Paduan Cu-30Ni mengalami perubahan kadar Cu sebanyak 0,7% dan perubahan kadar nikel sebanyak 0,5%. Paduan Cu-35Ni mengalami perubahan kadar Cu sebanyak 0,7% dan perubahan kadar nikel sebanyak 1,2%. Dan paduan terakhir,

yaitu paduan Cu-40Ni mengalami perubahan kadar Cu sebanyak 3,2% dan kadar nikel sebanyak 3,7%.

Perubahan unsur Cu yang paling banyak terdapat pada paduan 60Cu-40Ni dengan perubahan sebesar 3,2%. Dan perubahan pada unsur nikel yang paling besar juga terdapat pada paduan yang sama dengan perubahan sebesar 3.7%. Perubahan kadar unsur paduan disebabkan karena unsur tersebut menguap selama proses peleburan. Penggunaan *crucible* furnace menjadi salah satu penyebab penguapan ini terjadi. Kelemahan dari penggunaan *crucible furnace* yaitu pada kontrol waktu dan temperaturnya. Selama proses peleburan, waktu peleburan tidak dapat diatur secara sempurna. Hal ini disebabkan oleh temperatur peleburan yang tidak konstan dan cenderung berubah karena adanya *heat loss* ke lingkungan selama proses peleburan terjadi. Variabel waktu dan temperatur yang berubah-ubah memperbesar kemungkinan terjadinya *material loss* yang tidak terkontrol selama proses peleburan.

4.3 Pengamatan Pola XRD Paduan Cu-Ni

Pola XRD Paduan Cu-Ni dapat dilihat pada **Gambar 4.2**.



Gambar 4.2 Pola XRD Paduan Cu-Ni

Analisa hasil pengujian XRD dilakukan dengan software PCPDFWIN. Pada paduan 80Cu-20Ni, peak Cu muncul pada di sudut 2theta 38,430 pada bidang [3 1 1] dengan fasa tembaga. Fasa ini memiliki struktur kristal *face-centered cubic* dengan nomor PDF #011242. Peak Cu juga muncul di sudut 2theta 64,9560 pada bidang [2 0 0] dengan fasa tembaga. Fasa ini memiliki struktur kristal *face-centered cubic* dengan nomor PDF #031018. Pada paduan ini muncul juga peak Ni. Peak Ni muncul pada sudut 2theta 44,6564 pada bidang [0 1 1] dengan fasa nikel. Fasa ini memiliki struktur kristal *primitive hexagonal* dengan nomor PDF #451027. Peak Ni juga muncul di sudut 2theta 78,0233 pada bidang [1 0 3] dengan fasa nikel. Fasa ini memiliki struktur kristal *primitive hexagonal* dengan nomor PDF #451027.

Hasil analisa uji XRD dapat dilihat secara lengkap pada **Tabel 4.3** sebagai berikut.

Tabel 4.3 Analisa Hasil Uji XRD

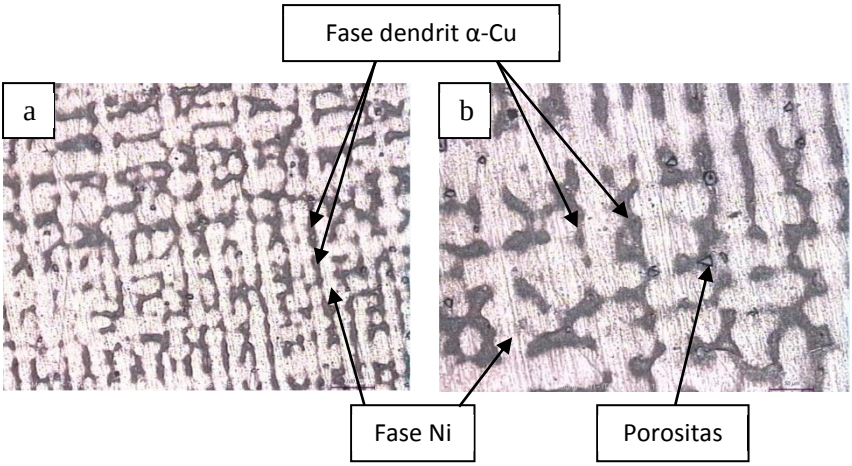
Material \ Fasa		Cu	Ni	Cu	Ni
Cu-20Ni	Peak (°)	38.4300	44.6564	64.9560	78.0233
	Bidang (h k l)	3 1 1	0 1 1	2 0 0	1 0 3
	Struktur Kristal	FCC	Hexagonal	FCC	Hexagonal
	No. PDF	011242	451027	031018	451027
Cu-25Ni	Peak (°)	38.4438	44.6628	64.9633	78.0378
	Bidang (h k l)	3 1 1	0 1 1	2 0 0	1 0 3
	Struktur Kristal	FCC	Hexagonal	FCC	Hexagonal
	No. PDF	011242	451027	031018	451027
Cu-30Ni	Peak (°)	38.4350	44.6578	64.9583	78.0294
	Bidang (h k l)	3 1 1	0 1 1	2 0 0	1 0 3
	Struktur Kristal	FCC	Hexagonal	FCC	Hexagonal
	No. PDF	011242	451027	031018	451027
Cu-35Ni	Peak (°)	38.4194	44.6535	64.9625	78.0251
	Bidang (h k l)	3 1 1	0 1 1	2 0 0	1 0 3
	Struktur Kristal	FCC	Hexagonal	FCC	Hexagonal
	No. PDF	11242	451027	031018	451027
Cu-40Ni	Peak (°)	38.4396	44.6618	64.9618	78.0392
	Bidang (h k l)	3 1 1	0 1 1	2 0 0	1 0 3
	Struktur Kristal	FCC	Hexagonal	FCC	Hexagonal
	No. PDF	011242	451027	031018	451027

Analisa pola XRD secara keseluruhan memberi penampakan fasa Cu dan Ni pada paduan. Setiap paduan memiliki peak tertinggi untuk fasa Cu dan fasa Ni.

4.4 Pengamatan Struktur Mikro Paduan Cu-Ni

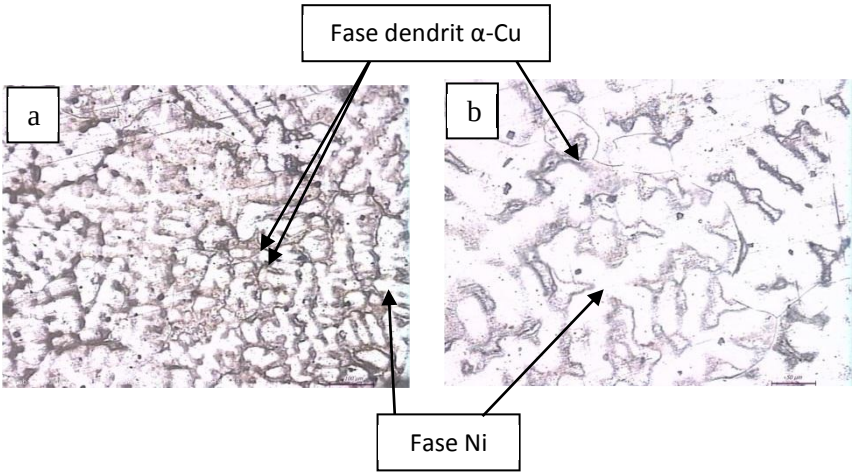
Dalam pengamatan struktur mikro sebetulnya hal yang susah untuk menentukan fasa apa yang terbentuk karena hanya terlihat gelap terang pada material uji. Pengujian XRD ini menjadi pembantu dalam menentukan fasa apa yang terbentuk dalam material uji.

Hasil pengujian struktur mikro paduan Cu-Ni dengan variasi komposisi nikel dapat dilihat pada **Gambar 4.3** sampai **Gambar 4.7**. Struktur mikro pada **Gambar 4.3** hingga **Gambar 4.7** menunjukkan bahwa dengan kenaikan komposisi nikel ukuran butir makin besar.



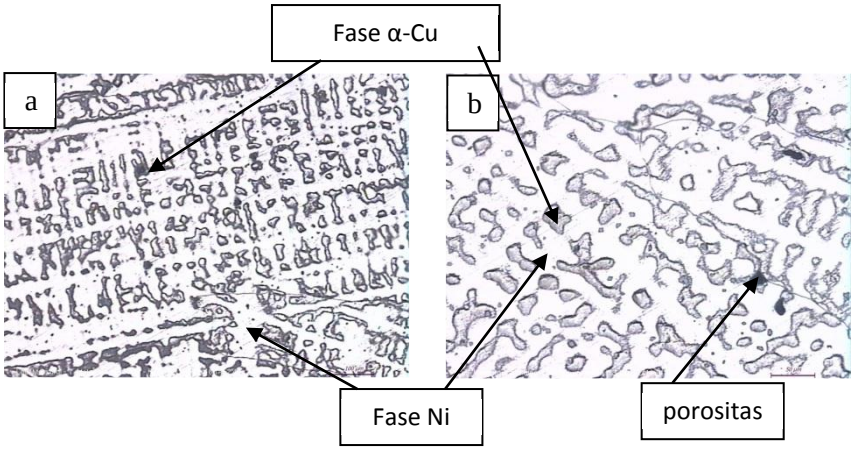
Gambar 4.3 Struktur mikro paduan Cu-20Ni dengan perbesaran a) 100x ; b) 200x

Gambar 4.3 menunjukkan hasil mikrostruktur paduan Cu-20Ni dengan perbesaran 100 kali dan 200 kali. Struktur mikro yang tampak berupa dendrit yang sangat berinti. Pada gambar ini terdapat 2 fasa yang terbentuk setelah terjadi proses pendinginan pada hasil pengecoran. Fasa-fasa yang terbentuk adalah fasa *twin-band* alfa-Cu dan fasa Ni. Bagian yang terang merupakan ekor dendrit yang kaya akan nikel, sedangkan daerah yang lebih gelap mengandung lebih banyak tembaga (Dundar, 2003). Fasa alfa tampak sebagai *twin-band* alfa-Cu. Porositas juga tampak pada paduan ini. Walaupun secara kasat mata tidak tampak adanya porositas, akan tetapi tetap terdapat porositas yang bersifat mikro.



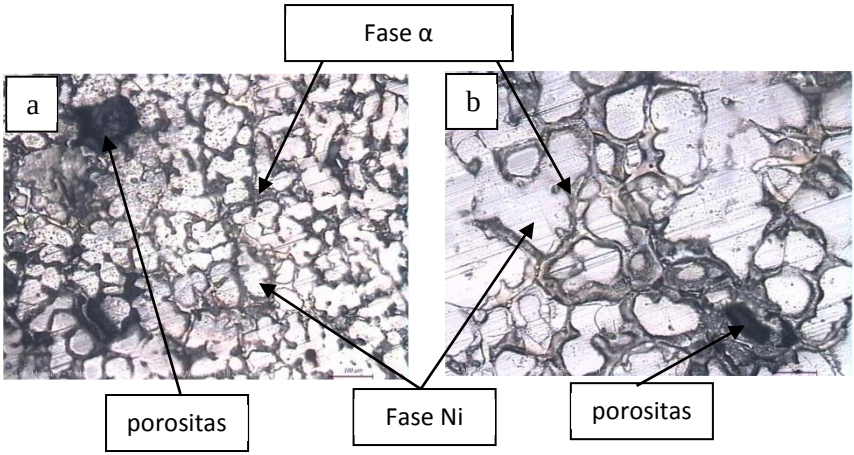
Gambar 4.4 Struktur mikro paduan Cu-25Ni dengan perbesaran a) 100x ; b) 200x

Gambar 4.4 menunjukkan hasil mikrostruktur paduan Cu-25Ni dengan perbesaran 100 kali dan 200 kali. Inti dendrit yang tampak pada paduan ini mulai terurai dan ukuran butir semakin besar. Pada gambar ini terdapat 2 fasa yang terbentuk setelah terjadi proses pendinginan pada hasil pengecoran. Fasa-fasa yang terbentuk adalah fasa *twin-band* alfa dan fasa Ni. Bagian yang terang merupakan ekor dendrit yang kaya akan nikel, sedangkan daerah yang lebih gelap mengandung lebih banyak tembaga. Fasa alfa tampak sebagai *twin-band* alfa. Tidak tampak adanya porositas pada paduan ini.



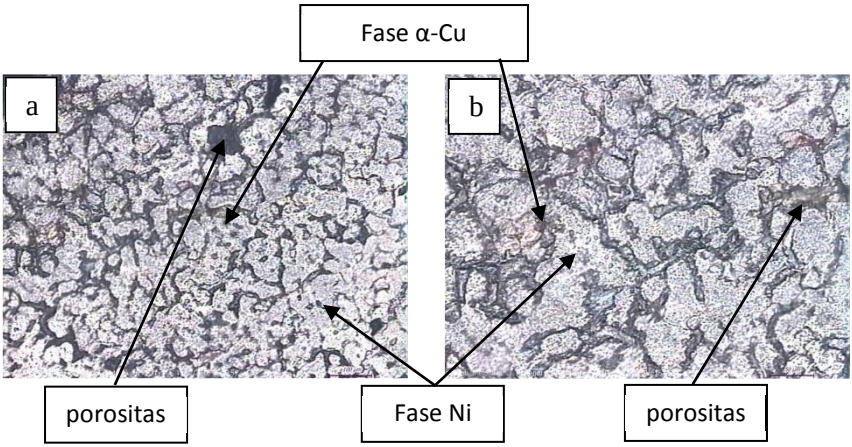
Gambar 4.5 Struktur mikro paduan Cu-30Ni dengan perbesaran a) 100x ; b) 200x

Gambar 4.5 menunjukkan hasil mikrostruktur paduan Cu-30Ni dengan perbesaran 100 kali dan 200 kali. Ekor dan cabang dendrit yang terbentuk semakin melebar dan mulai menyebar secara merata. Pada gambar ini terdapat 2 fasa yang terbentuk setelah terjadi proses pendinginan pada hasil pengecoran. Fasa-fasa yang terbentuk adalah fasa *twin-band* alfa-Cu dan fasa Ni. Bagian yang terang merupakan ekor dendrit yang kaya akan nikel, sedangkan daerah yang lebih gelap mengandung lebih banyak tembaga. Fasa alfa tampak sebagai *twin-band* alfa. Ukuran butir alfa tampak semakin mengecil karena kadar Ni yang semakin banyak. Hal ini menyebabkan ukuran dendrit semakin besar dengan fasa alfa yang kaya Cu semakin menyempit. Pada paduan ini juga tampak porositas.



Gambar 4.6 Struktur mikro paduan Cu-35Ni dengan perbesaran a) 100x ; b) 200x

Gambar 4.6 menunjukkan hasil mikrostruktur paduan Cu-35Ni dengan perbesaran 100 kali dan 200 kali. Ekor dan cabang dendrit yang terbentuk semakin melebar dan menyebar secara merata. Pada gambar ini terdapat 2 fasa yang terbentuk setelah terjadi proses pendinginan pada hasil pengecoran. Fasa-fasa yang terbentuk merupakan alfa-Cu dan fasa Ni. Bagian yang terang merupakan ekor dendrit yang kaya akan nikel (fasa Ni), sedangkan daerah yang lebih gelap mengandung lebih banyak tembaga (fasa alfa-Cu). Fasa alfa tidak lagi tampak sebagai *twin-band* alfa. Ukuran butir alfa tampak semakin menyempit karena kadar Ni yang semakin banyak. Hal ini disebabkan ukuran dendrit semakin besar seiring bertambahnya kadar Ni sehingga fasa alfa yang kaya Cu semakin menyempit. Pada paduan ini juga tampak porositas.



Gambar 4.7 Struktur mikro paduan Cu-40Ni dengan perbesaran a) 100x ; b) 200x

Gambar 4.7 menunjukkan hasil mikrostruktur paduan Cu-40Ni dengan perbesaran 100 kali dan 200 kali. Ekor dan cabang dendrit yang terbentuk semakin melebar dan mulai menyebar secara merata. Pada gambar ini terdapat 2 fasa yang terbentuk setelah terjadi proses pendinginan pada hasil pengecoran. Fasa-fasa yang terbentuk merupakan alfa-Cu dan fasa Ni. Bagian yang terang merupakan ekor dendrit yang kaya akan nikel, sedangkan daerah yang lebih gelap mengandung lebih banyak tembaga. Fasa alfa tidak lagi tampak sebagai *twin-band* alfa. Ukuran butir alfa tampak semakin menyempit karena kadar Ni yang semakin banyak. Hal ini disebabkan ukuran dendrit semakin besar sehingga fasa alfa yang kaya Cu semakin menyempit. Pada paduan ini juga tampak porositas.

Secara umum, paduan Cu-Ni terdiri atas fase Cu dan Ni. Hal ini didasarkan pada hasil XRD yang menunjukkan bahwa fasa yang terdapat pada paduan adalah fasa Cu dan fasa Ni. Ukuran butir tampak semakin besar seiring dengan penambahan nikel. Elemen paduan tampak sebagai baris gelap di seluruh butiran. Collini (2012), menyatakan bahwa mikrostruktur paduan

tembaga-nikel memiliki struktur fasa tunggal alfa karena nikel larut sepenuhnya dalam tembaga. Untuk material tempa, mikrostruktur paduan terdiri dari butiran kembar alfa tembaga. Penampakan dari elemen paduan muncul sebagai baris gelap atau garis-garis di seluruh butiran. Dundar (2003), mengatakan bahwa dendrit yang terbentuk pada paduan tembaga-nikel terdiri atas dendrit yang menempati butir utama. Dendrit terbagi atas dua daerah, yaitu daerah terang dan daerah gelap. Daerah terang merupakan ekor dari dendrit yang kaya akan nikel, sedangkan daerah gelap mengandung lebih banyak tembaga.

4.5 Pengujian Konduktivitas Listrik Paduan Cu-Ni

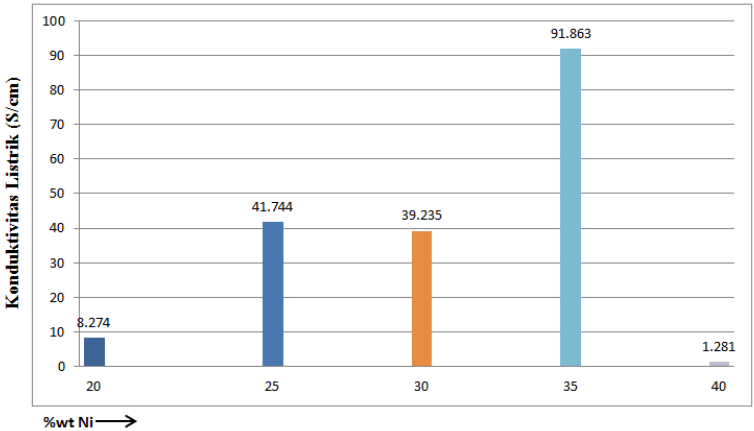
Konstantan, dengan fungsinya sebagai termokopel, diharuskan memiliki konduktivitas termal yang baik. Untuk membuktikan hal ini, diperlukan untuk meneliti sifat kelistrikannya. Sifat kelistrikan yang diuji merupakan nilai konduktivitas listriknya. Dalam penelitian ini, pengujian konduktivitas listrik dilakukan dengan metode *Four Point Probe* (FPP). Paduan Cu-Ni dipotong dan diratakan sehingga berukuran 10 x 10 x 2 mm^2. Kemudian paduan Cu-Ni disusun dalam suatu rangkaian tertutup. Untuk mengukur voltase digunakan voltmeter sedangkan untuk mengukur kuat arus menggunakan amperemeter. Paduan Cu-Ni, amperemeter, dan sumber arus disusun dalam sebuah rangkaian seri, sedangkan volmeter disusun secara paralel.

Dari hasil pengujian ini diperoleh konduktivitas listrik untuk masing-masing variasi paduan Cu-Ni seperti pada **Tabel 4.4**.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik

Spesimen	Tegangan	Konduktivitas (S/cm)
Cu-20Ni	60μV	8.105 8.4428
Rata-rata		**8.274**
Cu-25Ni	60μV	10.8453 47.365 67.021
Rata-rata		**41.744**
Cu-30Ni	60μV	43.155 35.189
Rata-rata		**39.235**
Cu-35Ni	60μV	95.8744 78.008 101.706
Rata-rata		**91.863**
Cu-40Ni	60μV	1.289 1.273
Rata-rata		**1.281**

Pengujian dilakukan pada tegangan 60μV beberapa replikasi. Berdasarkan pengujian FPP, dihasilkan nilai konduktivitas listrik dengan satuan S/cm seperti tabel di atas. Pada **Gambar 4.8**, tampak bahwa semakin banyak unsur Ni pada paduan maka nilai konduktivitas listriknya semakin naik. Hal ini tampak dari kenaikan grafik nilai konduktivitas listrik dari paduan Cu-20Ni ke paduan Cu-25Ni dan juga dari paduan Cu-30Ni ke paduan Cu-35Ni.



Gambar 4.8 Diagram Konduktivitas Listrik dari Paduan Cu-Ni

Nilai konduktivitas listrik pada paduan dipengaruhi dua hal, yaitu unsur paduan dan juga ukuran butirnya.

ASM International (2008) menyatakan bahwa nilai resistivitas tembaga akan meningkat seiring meningkatnya kadar nikel. Konduktivitas listrik merupakan nilai invers dari resistivitas, sehingga semakin tinggi konduktivitasnya maka nilai resistivitasnya akan semakin kecil.

Smallman (1999) juga menyatakan hal serupa bahwa konduktivitas logam penghantar listrik dipengaruhi oleh unsur pemadunya. Logam murni memiliki nilai konduktivitas listrik yang lebih baik dari pada yang lebih rendah kemurrniannya. Sehingga semakin banyak unsur pemadunya, maka nilai konduktivitasnya akan semakin kecil.

Hal ini bertentangan dengan Luo (2009) yang menyatakan bahwa ukuran butir mempengaruhi konduktivitas listrik. Ukuran butir yang semakin besar menyebabkan konduktivitas listrik semakin meningkat. Hal ini disebabkan sifat butir yang cenderung menahan arus listrik. Jika ukuran butir semakin besar, maka kecenderungan untuk menahan arus listrik akan berkurang sehingga konduktivitasnya akan semakin besar.

Pada pemelitian ini, nilai konduktivitas listrik dari paduan naik sampai kadar 35%wt nikel. Nilai konduktivitas listrik mencapai batas maksimal pada kadar tersebut. Pada kadar 40%wt nikel, nilai konduktivitas listrik menurun secara drastis. Hal ini membuktikan bahwa nilai konduktivitas listrik nikel akan naik sampai pada batas kadar nikel tertentu bila didasarkan pada perubahan ukuran butirnya.

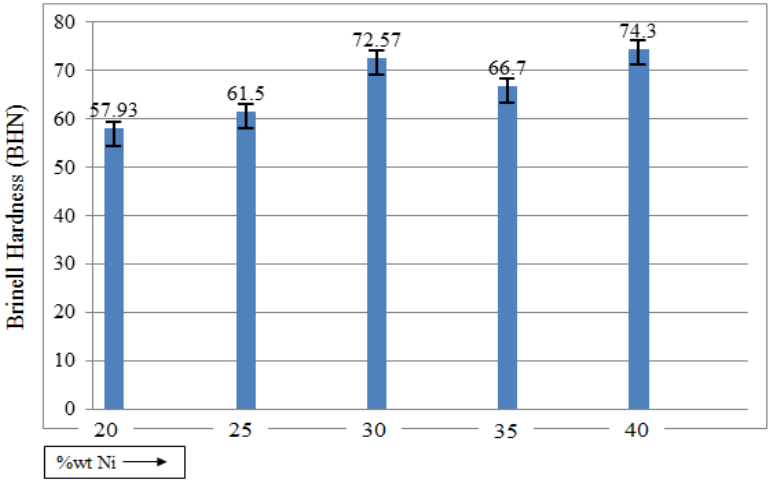
4.6 Pengujian Kekerasan

Tabel 4.5 dan **Gambar 4.9** menunjukkan perbedaan nilai kekerasan terhadap kadar nikel pada paduan Cu-Ni. Pengujian dilakukan dengan memberikan 3 indentasi pada setiap 1 spesimen sehingga di dapat 3 nilai kekerasan brinell tiap spesimen. Pengujian dilakukan selama 15 detik tiap titik uji. Nilai tersebut kemudian dihitung nilai rata-ratanya untuk mendapat nilai kekerasan brinell rata-rata untuk setiap spesimen. Hasil pengujian kekerasan pada beberapa titik memiliki sedikit perbedaan yang disebabkan oleh beberapa hal seperti preparasi alat maupun permukaan spesimen yang kurang rata.

Tabel 4.5 Nilai Kekerasan Paduan Cu-Ni

No	Paduan	Titik	HRB	Rata-rata
1	Cu-20Ni	1	58,5	57.93±0.6028
		2	58	
		3	57,3	
2	Cu-25Ni	1	62,4	61.5±1,5588
		2	59,7	
		3	62,4	
3	Cu-30Ni	1	69	72.57±3,2036
		2	73,5	
		3	75,2	
4	Cu-35Ni	1	67,8	66.7±0,9644
		2	66	
		3	66,3	
5	Cu-40Ni	1	70	74.3±4,0266
		2	78	
		3	74,8	

Penambahan nikel pada paduan Cu-Ni menambah kekerasan paduan. Hal ini dapat dilihat pada **Gambar 4.9** yang menunjukkan grafik kenaikan nilai kekerasan paduan yang berbanding lurus dengan penambahan kadar nikel.



Gambar 4.9 Pengaruh kadar Nikel terhadap nilai kekerasan Paduan Cu-Ni

Pada paduan Cu-35Ni terlihat bahwa nilai kekerasan dari paduan menurun. Hal ini disebabkan oleh porositas yang terdapat pada paduan. Yalcin (2009) berdasarkan penelitiannya menyatakan bahwa porositas bertampak buruk terhadap sifat mekanik dari material. Adanya porositas pada paduan akan menurunkan sifat mekaniknya.

Berdasarkan ASM International (2008), banyak sifat paduan Cu-Ni yang meningkat seiring dengan bertambahnya kadar nikel dalam paduan. Hal ini dikarenakan sifat tembaga dan nikel yang larut seutuhnya membentuk *solid solution*. Penambahan nikel terhadap tembaga secara signifikan meningkatkan kekuatannya, di mana *yield strength*, *tensile strength*, dan *fatique strength* akan mencapai nilai maksimum dengan penambahan sekitar 70%wt Ni. Penambahan jumlah nikel yang sedikit (1,5%) bahkan memberikan kekuatan impak sebanyak dua kali lipat. Smallman (1999), menyatakan bahwa nilai *tensile strength* dapat dihubungkan dengan nilai kekerasan. Hal ini dikarenakan pada saat indentasi, material di sekitar titik

indentasi akan mengalami deformasi plastis hingga persentase tegangan tertentu. Sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai *tensile strength* berbanding lurus dengan nilai kekerasan.

LAMPIRAN

LAMPIRAN A

Hasil Pengujian OES

Cu-20Ni

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID :	1	Material :	Paduan Cu & Ni
Customer :	Sdr. Paulindra M (T.Material ITS)	Dimension :	-
Lab-no. :	UJI BAHAN	Heat-no. :	-
Operator :	ELHAM	Ka. Laboratorium :	M. THORIQ WAHYUDI
Date :	01/06/2016		

Spektralanalysa Foundry-MASTER Grade :

	Cu	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni
1	77.6	0.0132	0.0017	0.0058	< 0.0001	0.0006	0.671	21.1
2	77.5	0.0108	0.0019	0.0064	0.0011	0.0008	0.535	21.4
3	77.9	0.0095	0.0009	0.0057	0.0001	0.0005	0.436	21.1
Ave	77.7	0.0112	0.0015	0.0059	0.0004	0.0006	0.547	21.2

	Si	Mg	Cr	Al	S	As	Be	Ag
1	0.141	0.0105	0.0026	0.124	0.0022	0.0021	< 0.0001	0.0012
2	0.112	0.0089	0.0025	0.164	0.0014	0.0013	< 0.0001	0.0011
3	0.0884	0.0055	0.0010	0.0820	0.0011	0.0009	< 0.0001	0.0013
Ave	0.113	0.0083	0.0020	0.123	0.0016	0.0014	< 0.0001	0.0012

	Co	Bi	Cd	Sb	Zr	B	Se	Te
1	< 0.0010	0.0008	< 0.0001	< 0.0005	0.0043	0.0023	0.0012	0.0052
2	< 0.0010	0.0007	< 0.0001	< 0.0005	0.0040	0.0017	0.0007	0.0101
3	< 0.0010	0.0016	< 0.0001	< 0.0005	0.0031	0.0017	0.0011	0.0064
Ave	< 0.0010	0.0010	< 0.0001	< 0.0005	0.0038	0.0019	0.0010	0.0072

	Ti	C	Nb
1	0.0007	> 0.0500	0.0069
2	0.0005	> 0.0500	0.0075
3	0.0004	> 0.0500	0.0080
Ave	0.0005	> 0.0500	0.0074

Cu-25Ni

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID :	2	Material :	Paduan Cu & Ni
Customer :	Sdr. Paulindra M (T.Material ITS)	Dimension :	-
Lab-no. :	UJI BAHAN	Heat-no. :	-
Operator :	ELHAM	Ka. Laboratorium :	M. THORIQ WAHYUDI
Date :	01/06/2016		

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Cu	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni
1	75.7	0.288	0.0057	0.0102	0.0002	0.0013	0.0550	23.7
2	75.8	0.284	0.0057	0.0089	0.0014	< 0.0010	0.0425	23.6
3	75.9	0.287	0.0055	0.0083	0.0006	< 0.0010	0.0303	23.5
Ave	75.8	0.286	0.0056	0.0091	0.0007	< 0.0010	0.0426	23.6

	Si	Mg	Cr	Al	S	Co	Bi	Sb
1	0.0088	0.0027	< 0.0003	0.0397	0.0137	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0018
2	< 0.0006	0.0016	< 0.0003	0.0327	0.0133	< 0.0005	0.0010	< 0.0018
3	< 0.0006	0.0009	< 0.0003	0.0231	0.0117	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0018
Ave	0.0029	0.0017	< 0.0003	0.0318	0.0129	< 0.0005	0.0005	< 0.0018

	Ti	C	Nb
1	0.0012	0.134	0.0069
2	0.0006	0.137	0.0060
3	0.0008	0.133	0.0059
Ave	0.0009	0.134	0.0062

Cu-30Ni

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID :	3	Material :	Paduan Cu & Ni
Customer :	Sdr. Paulindra M (T.Material ITS)	Dimension :	-
Lab-no. :	UJI BAHAN	Heat-no. :	-
Operator :	ELHAM	Ka. Laboratorium :	M. THORIQ WAHYUDI
Date:	01/06/2016		

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Cu	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni
1	69.4	0.121	0.0011	0.0063	0.0018	0.0011	0.527	29.4
2	69.2	0.107	0.0023	0.0073	0.0013	0.0010	0.467	29.7
3	69.4	0.110	0.0016	0.0059	0.0001	< 0.0010	0.550	29.4
Ave	69.3	0.113	0.0017	0.0062	0.0011	< 0.0010	0.515	29.5

	Si	Mg	Cr	Al	S	Co	Bi	Sb
1	0.208	0.0195	< 0.0003	0.0335	0.0169	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0018
2	0.176	0.0136	< 0.0003	0.0214	0.0157	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0018
3	0.174	0.0179	< 0.0003	0.0239	0.0155	< 0.0005	0.0013	< 0.0018
Ave	0.187	0.0170	< 0.0003	0.0263	0.0160	< 0.0005	0.0005	< 0.0018

	Ti	C	Nb
1	0.0011	0.209	0.0050
2	0.0009	0.227	0.0060
3	0.0008	0.189	0.0099
Ave	0.0010	0.209	0.0076

Cu-35Ni

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID :	4	Material :	Paduan Cu & Ni
Customer :	Sdr. Paulindra M (T.Material ITS)	Dimension :	-
Lab-no. :	UJI BAHAN	Heat-no. :	-
Operator :	ELHAM	Ka. Laboratorium :	M. THORIQ WAHYUDI
Date :	01/06/2016		

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Cu	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni
1	65.7	0.181	0.0037	0.0056	0.0021	< 0.0010	0.0284	33.9
2	65.9	0.199	0.0041	0.0074	0.0013	0.0010	0.0258	33.6
3	65.7	0.216	0.0036	0.0070	0.0016	< 0.0010	0.0249	33.8
Ave	65.7	0.199	0.0038	0.0067	0.0016	< 0.0010	0.0264	33.8

	Si	Mg	Cr	Al	S	Co	Bi	Sb
1	< 0.0006	0.0001	< 0.0003	0.0072	0.0288	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0018
2	< 0.0006	< 0.0001	< 0.0003	0.0052	0.0264	< 0.0005	0.0016	< 0.0018
3	< 0.0006	< 0.0001	< 0.0003	0.0052	0.0254	< 0.0005	0.0007	< 0.0018
Ave	< 0.0006	< 0.0001	< 0.0003	0.0058	0.0269	< 0.0005	0.0007	< 0.0018

	Ti	C	Nb
1	0.0008	0.124	0.0075
2	0.0008	0.123	0.0074
3	0.0009	0.120	0.0068
Ave	0.0008	0.122	0.0073

Cu-40Ni

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID :	5	Material :	Paduan Cu & Ni
Customer :	Sdr. Paulindra M (T.Material ITS)	Dimension :	-
Lab-no. :	UJI BAHAN	Heat-no. :	-
Operator :	ELHAM	Ka. Laboratorium :	M. THORIQ WAHYUDI
Date:	01/06/2016		

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Cu	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni
1	63.1	0.0900	0.0035	0.0108	0.0009	< 0.0010	0.0096	36.5
2	63.2	0.106	0.0038	0.0101	0.0009	0.0016	0.0064	36.4
3	63.4	0.131	0.0037	0.0100	0.0008	< 0.0010	0.0061	36.1
Ave	63.2	0.109	0.0037	0.0103	0.0009	0.0010	0.0074	36.3

	Si	Mg	Cr	Al	S	Co	Bi	Sb
1	< 0.0006	< 0.0001	< 0.0003	0.0023	0.0581	< 0.0005	0.0020	< 0.0018
2	< 0.0006	< 0.0001	< 0.0003	0.0025	0.0530	< 0.0005	0.0008	< 0.0018
3	< 0.0006	< 0.0001	< 0.0003	0.0028	0.0514	< 0.0005	0.0013	< 0.0018
Ave	< 0.0006	< 0.0001	< 0.0003	0.0025	0.0541	< 0.0005	0.0014	< 0.0018

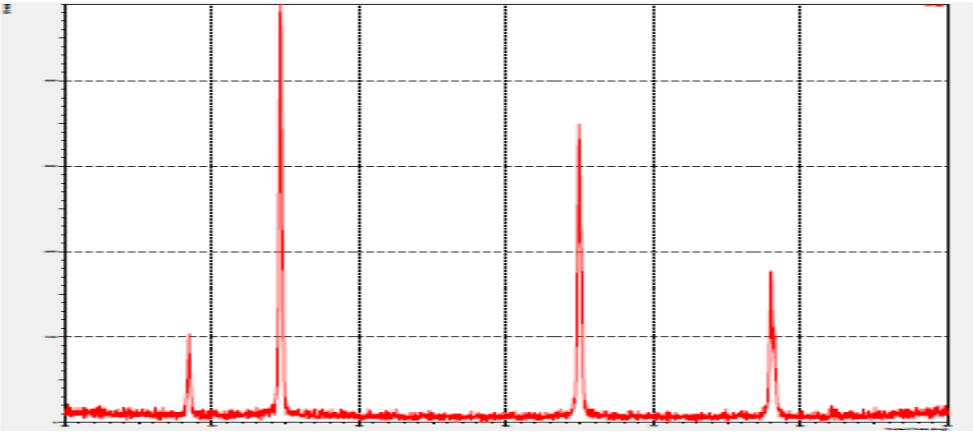
	Ti	C	Nb
1	0.0009	0.120	0.0081
2	0.0010	0.118	0.0066
3	0.0012	0.125	0.0086
Ave	0.0010	0.121	0.0078

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN B

Hasil Pengujian XRD

Cu-20Ni



*** Basic Data Process ***

Group : KENSA
Data : Paulindra

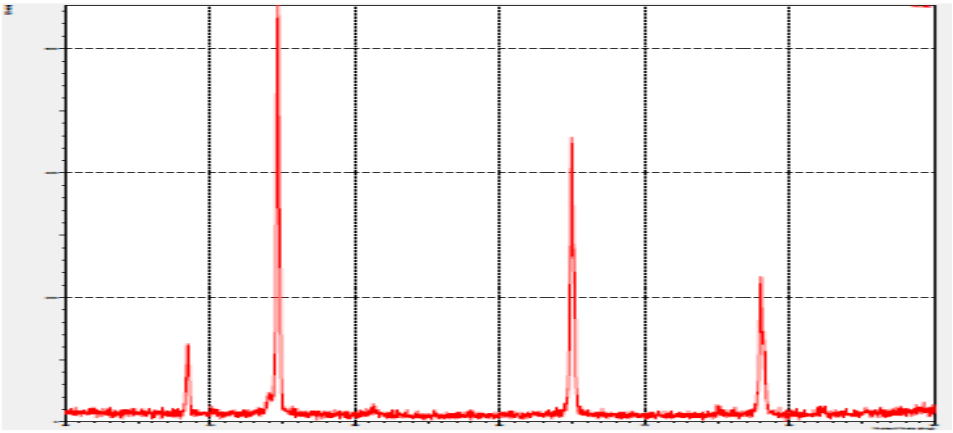
Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	2	44.6564	2.02758	100	0.20120	369	4062
2	4	64.9560	1.43452	79	0.21040	290	3238
3	5	78.0233	1.22371	41	0.21550	151	1960

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	38.4380	2.34006	16	0.18200	59	626
2	44.6564	2.02758	100	0.20120	369	4062
3	64.6028	1.44150	3	0.16000	11	185
4	64.9560	1.43452	79	0.21040	290	3238
5	78.0233	1.22371	41	0.21550	151	1960

Cu-25Ni



Group : KENSA
Data : Paulindra2

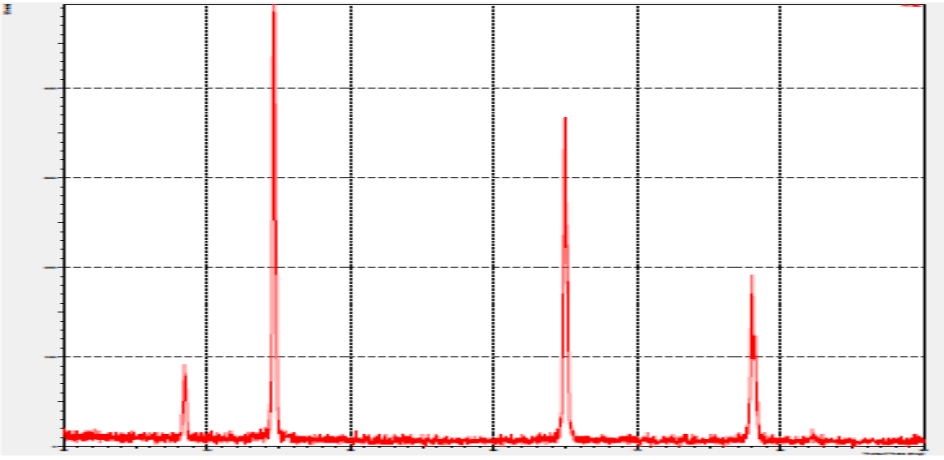
Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	3	44.6628	2.02730	100	0.19070	513	4915
2	5	64.9633	1.43437	72	0.21230	368	4454
3	6	78.0378	1.22352	37	0.22350	192	2443

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	38.4438	2.33972	15	0.21320	78	875
2	44.1178	2.05107	3	0.30670	17	398
3	44.6628	2.02730	100	0.19070	513	4915
4	44.8708	2.01839	5	0.10280	28	407
5	64.9633	1.43437	72	0.21230	368	4454
6	78.0378	1.22352	37	0.22350	192	2443

Cu-30Ni



Group : KENSA
Data : Paulindra3

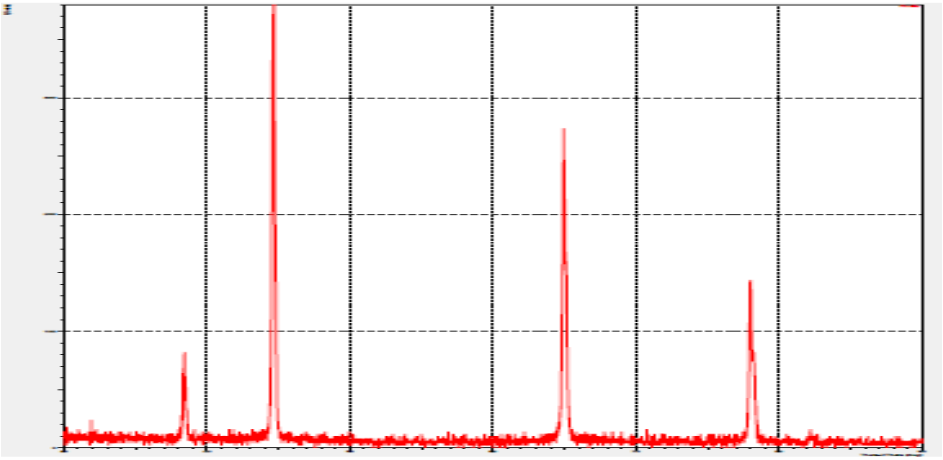
Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	3	44.6578	2.02752	100	0.19850	383	3956
2	5	64.9583	1.43447	78	0.20680	298	3422
3	7	78.0294	1.22363	39	0.21060	148	1653

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	38.4350	2.34023	14	0.22280	53	645
2	44.3711	2.03995	4	0.08000	14	137
3	44.6578	2.02752	100	0.19850	383	3956
4	44.8908	2.01753	6	0.07000	23	159
5	64.9583	1.43447	78	0.20680	298	3422
6	77.8391	1.22615	8	0.12800	31	300
7	78.0294	1.22363	39	0.21060	148	1653

Cu-35Ni



Group : KENSA
Data : Paulindra4

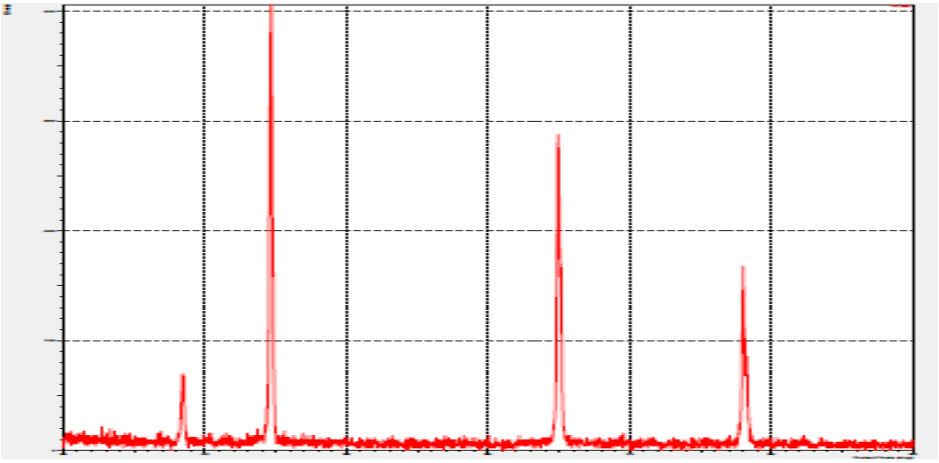
Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	2	44.6535	2.02770	100	0.19780	292	3250
2	3	64.9625	1.43439	74	0.20530	215	2560
3	4	78.0251	1.22369	42	0.21460	122	1415

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	38.4194	2.34115	18	0.18390	52	573
2	44.6535	2.02770	100	0.19780	292	3250
3	64.9625	1.43439	74	0.20530	215	2560
4	78.0251	1.22369	42	0.21460	122	1415
5	78.3840	1.21898	4	0.17000	11	126

Cu-40Ni



Group : KENSA
Data : Paulindra5

Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	2	44.6618	2.02734	100	0.21060	304	3461
2	4	64.9618	1.43440	80	0.19950	242	2467
3	7	78.0392	1.22350	42	0.20510	128	1406

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	38.4396	2.33996	14	0.25730	43	593
2	44.6618	2.02734	100	0.21060	304	3461
3	64.6628	1.44031	4	0.12000	12	132
4	64.9618	1.43440	80	0.19950	242	2467
5	65.2227	1.42929	4	0.09000	11	166
6	77.7391	1.22747	3	0.12000	10	107
7	78.0392	1.22350	42	0.20510	128	1406
8	78.4123	1.21861	3	0.18670	9	116

PDF CARD

PDF # 011242, Wavelength = 0.709 (A)

01-1242 (Deleted)

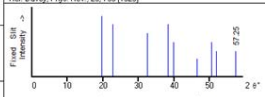
CAS Number:

Molecular Weight: 63.55
Volume[CD]: 46.54
Dx: 9.069 Dm: 9.010

Sys: Cubic
Lattice: Face-centered
S.G.: Fm3m (225)
Cell Parameters:
a 3.597 b c
α β γ

SS/FOM: F 9=7(0.174, 8)
I/Icor:
Rad: MoKa
Lambda: 0.709
Filter:
d-sp:

Cu
Copper
Ref: Davey, Phys. Rev., 25, 753 (1925)



2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l
19.626	100	1	1	1	38.324	86	3	1	1	50.568	56	3	3	1
22.717	86	2	0	0	39.859	56	2	2	2	51.909	42	4	2	0
32.417	71	2	2	0	46.393	29	4	0	0	57.247	42	4	2	2

PDF # 031018, Wavelength = 1.93597 (A)

03-1018 (Deleted)

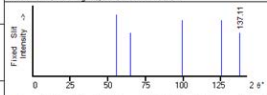
CAS Number:

Molecular Weight: 63.55
Volume[CD]: 46.96
Dx: 8.989 Dm: 8.950

Sys: Cubic
Lattice: Face-centered
S.G.: Fm3m (225)
Cell Parameters:
a 3.607 b c
α β γ

SS/FOM: F 4=3(0.276, 5)
I/Icor:
Rad: FeKa1
Lambda: 1.93597
Filter:
d-sp:

Cu
Copper
Ref: Allis-Chalmers Mfg. Co, Private Communication



2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l
55.469	100	1	1	1	99.316	90				137.10	70	2	2	2
65.064	70	2	0	0	125.26	90	3	1	1					

PDF # 451027, Wavelength = 1.54056 (A)

45-1027 Quality:

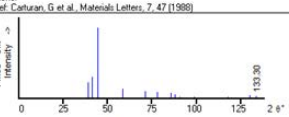
CAS Number: 7440-02-0

Molecular Weight: 58.70
Volume[CD]: 26.44
Dx: 7.372 Dm:

Sys: Hexagonal
Lattice: Primitive
S.G.: P63/mmc (194)
Cell Parameters:
a 2.651 b c 4.343
α β γ

SS/FOM: F16=12(0.080, 16)
I/Icor:
Rad: CuKa1
Lambda: 1.54056
Filter:
d-sp: diffractometer

Ni
Nickel
Ref: Carturan, G et al., Materials Letters, 7, 47 (1988)



2θ	Int-f	h	k	l
39.100	22	0	1	0
41.530	30	0	0	2
44.520	100	0	1	1
58.420	13	0	1	2
70.960	10	1	1	0
78.000	8	1	0	3
84.240	<1	2	0	0
85.790	7	1	1	2
87.850	5	2	0	1
90.530	2	0	0	4
98.730	2	2	0	2
103.57	<1	0	1	4
117.93	2	2	0	3
125.16	<1	[2	1	0]
129.72	4	[2	1	1]
133.30	3	1	1	4

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN C

Hasil Pengujian DSC

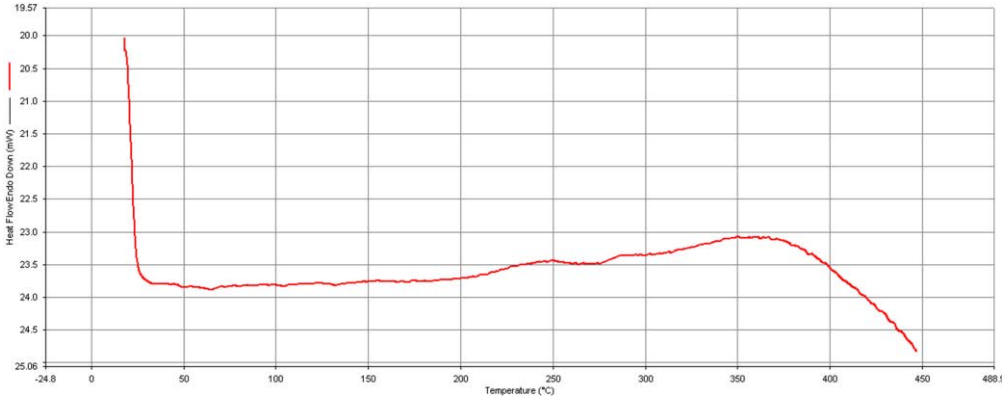
Cu-20Ni

Sample : PM 01 (Cu Ni 01)

Purge gas : Nitrogen (20 cc/min)

Scan rate : 10°C/min

Weight : 50 mg



time (min)	sample temp (oC)	heatflow (mW)	baseline (mW)	program temp	approx gas flow	Cp (mW/C)	k
3.283333	50.085758	23.929093	0.078068	52.833333	19.8		
8.283333	100.095691	23.932905	0.118057	102.833333	19.8	7.62249E-05	455207.2245
13.283333	150.086429	23.890645	0.134112	152.833333	19.8	-0.000845357	-5048385.043
18.283333	200.097457	23.8317	0.120432	202.833333	19.8	-0.00117864	-7038720.45
23.283333	250.092712	23.530493	0.088734	252.833333	19.8	-0.006024712	-35978976.07
28.283333	300.096367	23.320962	-0.040691	302.833333	19.8	-0.004190314	-25024134.31
33.283333	350.091957	23.000547	-0.069862	352.833333	19.8	-0.006408865	-38273102.46
38.283333	400.093327	23.49519	-0.055491	402.833333	19.8	0.009892589	59077551.91

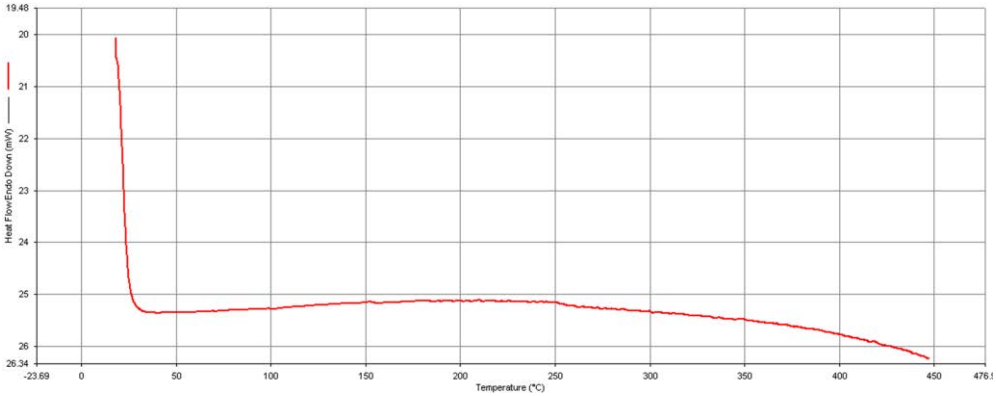
Cu-25Ni

Sample : PM 02 (Cu Ni 02)

Purge gas : Nitrogen (20 cc/min)

Scan rate : 10°C/min

Weight : 50 mg



time (min)	sample temp (oC)	heatflow (mW)	baseline (mW)	program temp	approx gas flow	Cp (mW/C)	k
3.283333	50.069262	25.426033	0.078068	52.833333	19.8		
8.283333	100.069682	25.401953	0.118057	102.833333	19.8	-0.0004816	-2876043
13.283333	150.061654	25.288914	0.134112	152.833333	19.8	-0.00226114	-1.4E+07
18.283333	200.082413	25.245394	0.120432	202.833333	19.8	-0.00087004	-5195785
23.283333	250.072302	25.251762	0.088734	252.833333	19.8	0.00012739	760735
28.283333	300.081547	25.295039	-0.040691	302.833333	19.8	0.00086538	5167963
33.283333	350.079404	25.417905	-0.069862	352.833333	19.8	0.00245743	14675498
38.283333	400.064128	25.72034	-0.055491	402.833333	19.8	0.00605055	36133271

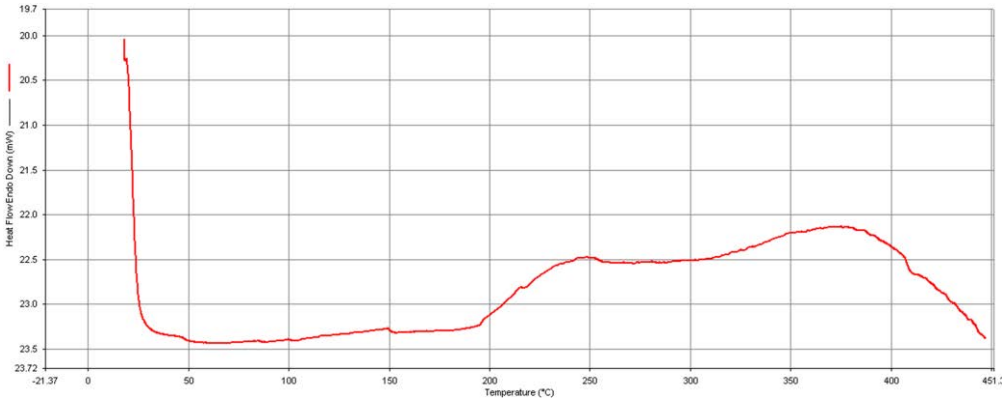
Cu-30Ni

Sample : PM 03 (Cu Ni 03)

Purge gas : Nitrogen (20 cc/min)

Scan rate : 10°C/min

Weight : 50 mg



time (min)	sample temp (oC)	heatflow (mW)	baseline (mW)	program temp	approx gas flow	Cp (mW/C)	k
3.283333	50.025837	23.488309	0.078068	52.833333	19.8		
8.283333	100.025364	23.515442	0.118057	102.833333	19.8	0.000542665	3240742
13.283333	150.027014	23.42088	0.134112	152.833333	19.8	-0.001891178	-1.1E+07
18.283333	200.030202	23.238103	0.120432	202.833333	19.8	-0.003655307	-2.2E+07
23.283333	250.051803	22.573114	0.088734	252.833333	19.8	-0.013294037	-7.9E+07
28.283333	300.053546	22.473199	-0.040691	302.833333	19.9	-0.00199823	-1.2E+07
33.283333	350.049396	22.13787	-0.069862	352.833333	19.9	-0.006707137	-4E+07
38.283333	400.056597	22.298295	-0.055491	402.833333	19.9	0.003208038	19158082

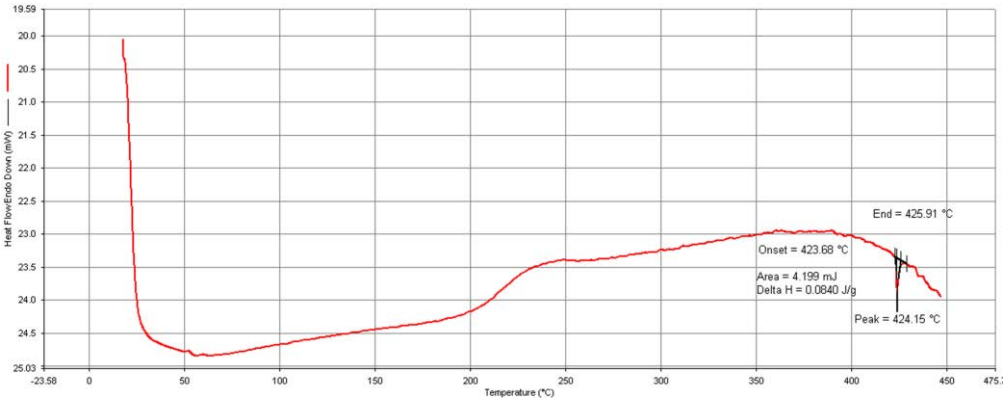
Cu-35Ni

Sample : PM 04 (Cu Ni 04)

Purge gas : Nitrogen (20 cc/min)

Scan rate : 10°C/min

Weight : 50 mg



time (min)	sample temp (oC)	heatflow (mW)	baseline (mW)	program temp	approx gas flow	Cp (mW/C)	k
3.283333	50.123696	24.858101	0.078068	52.833333	19.8		
8.283333	100.164914	24.788243	0.118057	102.833333	19.8	-0.001396	-8336827.257
13.283333	150.168618	24.575929	0.134112	152.833333	19.8	-0.004246	-25356481.12
18.266667	200.003602	24.290218	0.120373	202.666667	19.8	-0.0057331	-34237745.94
23.266667	250.027712	23.481394	0.089622	252.666667	19.8	-0.0161687	-96557760.76
28.266667	300.022694	23.195845	-0.040212	302.666667	19.9	-0.0057116	-34108824.62
33.266667	350.027141	22.940955	-0.069781	352.666667	19.8	-0.0050973	-30440844.41
38.266667	400.016705	22.965914	-0.055697	402.666667	19.8	0.00049928	2981675.377

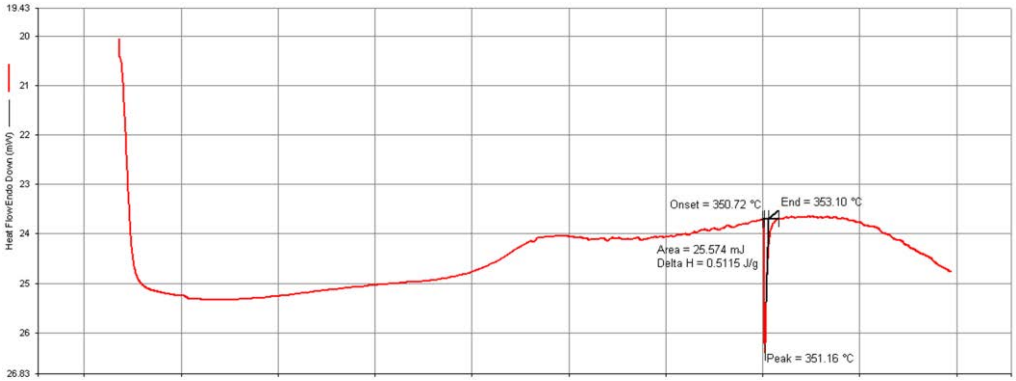
Cu-40Ni

Sample : PM 05 (Cu Ni 05)

Purge gas : Nitrogen (20 cc/min)

Scan rate : 10°C/min

Weight : 50 mg



time (min)	sample temp (oC)	heatflow (mW)	baseline (mW)	program temp	approx gas flow	Cp (mW/C)	k
3.3	50.158698	25.325976	0.07832	53	19.8		
8.283333	100.017692	25.383669	0.118057	102.833333	19.8	0.001157123	6910224.195
13.28333	150.021439	25.16887	0.134112	152.833333	19.8	-0.00429566	-25653240.51
18.28333	200.026333	24.888307	0.120432	202.833333	19.8	-0.00561071	-33506603.97
23.28333	250.049324	24.143633	0.088734	252.833333	19.8	-0.01488663	-88901494.53
28.28333	300.041447	24.021939	-0.040691	302.833333	19.8	-0.00243426	-14537178.16
33.28333	350.038149	23.637768	-0.069862	352.833333	19.9	-0.00768393	-45887642.65

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DOKUMENTASI

Raw Material

Copper rod

Nickel Sheet

Burner Furnace

Krus Grafit

Proses Peleburan

Proses penuangan dan logam yang telah lebur

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan pada penelitian ini adalah :

a. Pengaruh kadar nikel adalah memperlebar dendrit yang terbentuk pada struktur mikro paduan Cu-Ni. Inti dendrit akan semakin melebar seiring dengan bertambahnya kadar nikel pada paduan. Dendrit pada paduan terdiri dari 2 fasa, yaitu fasa terang yang kaya akan nikel, dan fasa yang gelap yang kaya akan tembaga. Struktur alfa-Cu pada struktur mikro akan semakin menyempit seiring dengan melebarnya luas dendrit.
b. Pengaruh kadar nikel pada sifat listrik paduan Cu-Ni cenderung menaikkan nilai konduktivitasnya. Nilai konduktivitas tertinggi terdapat pada paduan Cu-35Ni dengan nilai konduktivitas 91.863 S/cm dan turun drastis pada paduan Cu-40Ni. Nilai konduktivitas yang meningkat disebabkan faktor ukuran butir dan penambahan nikel pada paduan.
c. Pengaruh kadar nikel dapat meningkatkan nilai kekerasan pada paduan Cu-Ni. Nilai kekerasan tertinggi terdapat pada paduan Cu-40Ni dengan nilai kekerasan 74,3 HRB. Naiknya nilai kekerasan disebabkan sifat tembaga yang nikel yang membentuk *solid solution* di sepanjang diagram fasanya. *Solid solution* pada paduan dapat meningkatkan sifat mekaniknya sampai batas tertentu.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan :

a. Menggunakan vakum *furnace* agar variabel temperatur dan waktu dapat dikontrol dengan baik.

b. Menggunakan peralatan uji yang telah dikalibrasi sesuai dengan standar yang ada.
c. Memastikan bahwa cetakan pasir sudah benar-benar padat untuk meminimalisir porositas dan penyusutan.

DAFTAR PUSTAKA

___. 2008. **ASM International: Elements of Metallurgy and Engineering Alloys**. ASM International Handbook Committee (#05224G).

___. 2001. **ASM Metal Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and Hig Performance Alloys.**. ASM International Handbook Committee.

___. 2001. **ASM Metal Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. ASM International Handbook Committee.

___. 2004. **ASM Metal Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures**. ASM International Handbook Committee.

___. 1999. **ASTM International: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys**. ASTM International

___. 1993. **ASTM International: Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples**. ASTM International

___. 2001. **ASTM International: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials**. ASTM International

___. 1998. **British Standard Institute (BS 6783): Sampling and analysis of nickel, ferronickel and nickel alloys. Method for the determination of cobalt in nickel alloys (potentiometric titration method using potassium hexacyanoferrate (III))**. British Standards Institute.

___. 2008. **ITS-90 : Thermocouple Database**. National Institute of Standards and Technology.

Beckwith, T.G. and N.L. Buck,. 1961. **Mechanical Measurements**. Reading, MA: Addison-Wesley

Boss, C. B. (2004). **Concepts, Instrumentation and Techniques in Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy**. Shelton: PerkinElmer

Cardarelli, F. (2008). **Materials Handbook A Concise Desktop Reference Second Edition**. London: Springer.

Collini, Luca. (2012). **Copper Alloys - Early Applications and Current Performance - Enhancing Processes**. InTech

Daryanto. 2010, **Proses Pengolahan Besi dan Baja (Ilmu Metalurgi)**. Sarana Tutorial Nurani, Bandung.

Dundar, Sacit. 2003. **Dendritic Solidification in a Copper Nickel Alloy**. Istanbul University-Turkey.

John, Cowie. 2006. **Copper and Copper Alloys**. ResearchGate.

Kalpakjian, Serope., et al. 2009. **Manufacturing Engineering And Technology, Sixth Edition in SI Units**. New York: Prentice Hall.

Kasap, Safa. (1997). **Thermoelectric Effects in Metals : Thermocouples.** Department of Electrical Engineering, University of Saskatchewan, Canada

Kaufmann, E.N. (2003). **Characterization Of Materials: Volumes 1 and 2.** Hoboken: John Wiley & Sons.

Kerfoot, Derek G. E., 2000. **Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. Canada: Sheritt Gordon.

Kerlin., W Thomas. 2012. **Practival Thermocouple Thermometry, 2nd Edition**. USA: International Society of Automation (ISA).

Kutz, Myer. 2006**. Mechanical Engineers' Handbook Third Edition: Materials and Mechanical Design**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Lion, K.S., 1959**. Instrumentation in Scientific Research: Electrical Input Transducers**. New York: McGraw-Hill Book Co., Inc.

Luo, Wei. 2009. **Grain Size Effect on Electrical Conductivity and Giant Magnetoresistance of Bulk Magnetic Polycrystals**. Department of Mechanics and Engineering Science, College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University-Lanzhou.

Northrop, Robert B., 2005. **Introduction to Instrumentation And Measurements, Second Edition**. Boca Raton: Taylor and Francis Group, LLC.

R.A. Flinn. 1961. **Copper, brass and bronze Castings, Non-Ferrous**. Cleveland: Founders' Society, Inc.

Ross, Robert B., 1992**. Metallic Materials Specification Handbook, 4th Edition**, Volume 1. Glasgow: Chapman & Hall.

Skočovský, P. et al. (2000)**.** ***Designing materials*** **[in Slovak] (1st edition)**, EDIS, ISBN 80-7100-608-4, Žilina, Slovak Republic.

Skočovský, P. et al. (2006). ***Material sciences for the fields of mechanical engineering*** **[in Slovak] (2nd edition)**, EDIS, ISBN 80-8070-593-3, Žilina, Slovak Republic.

Smallman, R. E., Bishop, R. J. 1999. **Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering – Sixth Ed. - Science, process, applications**. Butterworth-Heinemann, Oxford.

Tjitro, Soejono., Gunawan, Hendri. 2004. **Analisa Pengaruh Bentuk Penampang Riser Terhadap Cacat Porositas**. Universitas Kristen Petra.

Wari, Wahyu Naris. 2012. **Mengenal Sifat Listrik Material Serta Menentukan Nilai Resistivitas Dan Konduktivitas Batu Arang (C) dan Batu Kapur ($CaCO_3$) Dengan Metode Four Point Probe.** Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Yalcin, Bekir. 2009. **Effect of Porosity on the Mechanical Properties and Wear Performance of 2% Copper Reinforced Sintered Steel Used in Shock Absorber Piston Production**. Technical Education Faculty, SÄuleyman Demirel University – Turkey.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS

Penulis bernama lengkap Paulindra Mangasitua Pangaribuan. Sehari-hari penulis dipanggil Paul. Dilahirkan dari keluarga sederhana sebagai anak pertama dari empat bersaudara oleh pasangan bernama Tua Pangaribuan dan Parulian Simamora pada tanggal 4 Agustus 1994. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Katolik San Francesco Balige (2000-2006), SMP Swasta Budhi Dharma Balige (2006-2009), SMAN 2 Balige (2009-2012) dan menjalani dunia perkuliahan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS mulai 2012.

Di dunia kampus, penulis aktif sebagai Staff BSO Minat Bakat HMMT FTI-ITS. Selain aktif sebagai staff, penulis juga aktif di kegiatan kampus lainnya misalnya sebagai Ketua Panitia Pemilihan Umum Ketua HMMT FTI-ITS 2014-2015, Panitia Kongres IKAMAT 2016, maupun kegiatan yang lainnya. Di tahun ketiga, penulis menjabat sebagai Kepala Divisi Event BSO Minat Bakat HMMT FTI-ITS dan juga Ketua Divisi Seni dan Budaya di Paguyuban Mahasiswa Bona Pasogit ITS. Di bidang akademik, penulis pernah menjadiAsisten Laboratorium Kimia Material suntuk mata kuliah Kimia Analitik pada tahun 2014 dan juga Asisten Laboratorium Metalurgi untuk mata kuliah Teknologi Cor pada tahun 2015. Selain aktif di kegiatan kampus, penulis juga aktif dalam bidang agama di Gereja HKBP Manyar Surabaya sebagai *conductor* dari Paduan Suara Muda/i HKBP Manyar dan juga menjadi Pengurus Inti dari Naposobulung